INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

COSMOLOGÍA
Las huellas de la gran explosión

ENERGÍA
Sistemas geotérmicos mejorados

MEDIOAMBIENTE
Evitar el colapso de ecosistemas

El lenguaje del cerebro

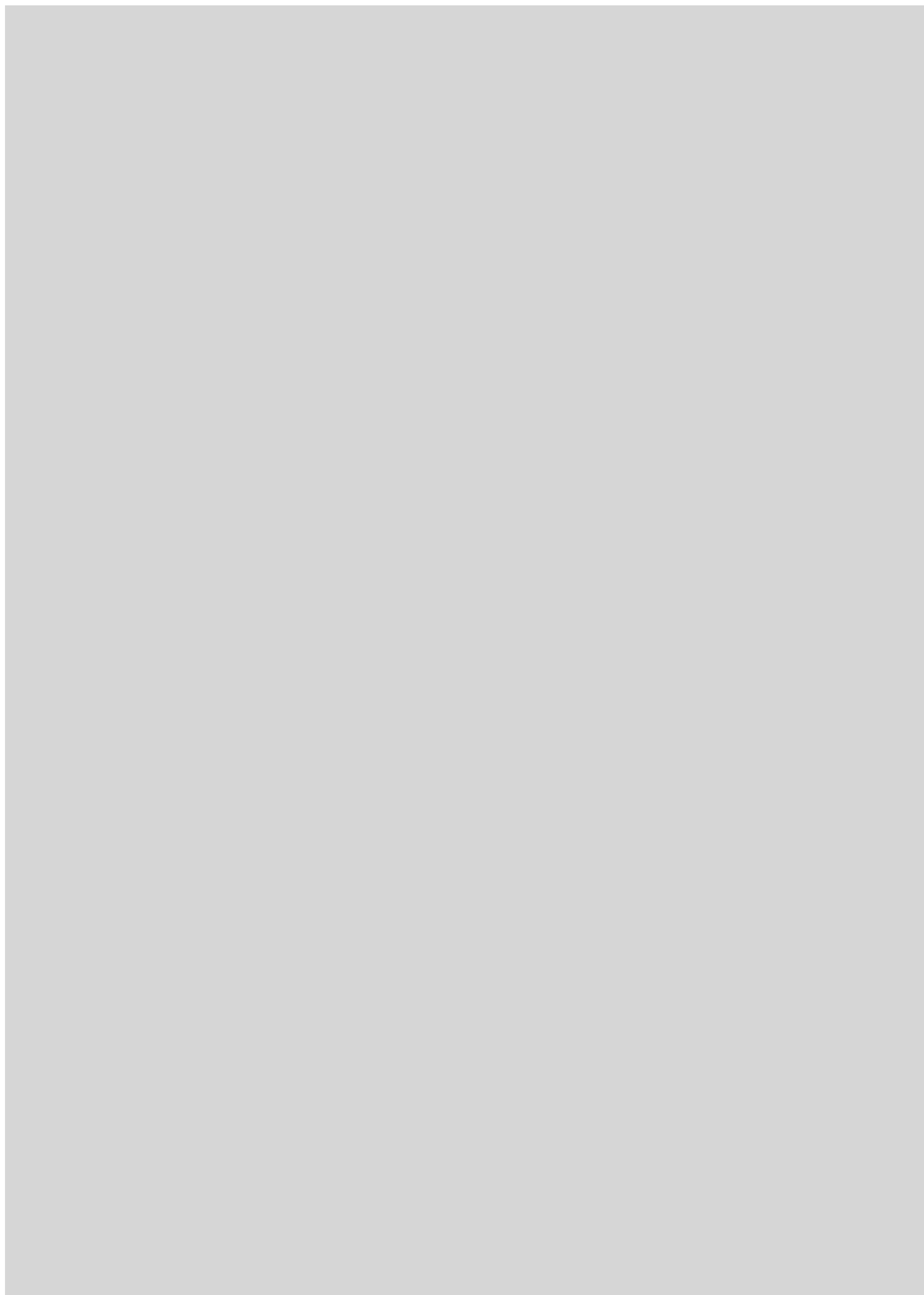
La sincronización de las neuronas resulta clave para nuestra interpretación de las experiencias

INFORME ESPECIAL

Estado de la *ciencia global* 2012



6,50 EUROS



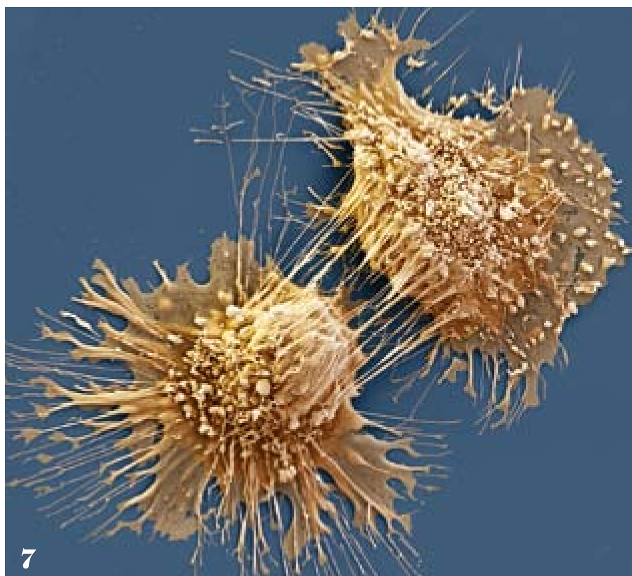


62

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Diciembre 2012 Número 435

ARTÍCULOS

DAVID LIITTSCHWAGER


7


10

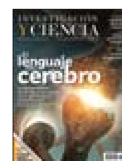

34

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

El modo en que los miles de millones de neuronas se comunican entre sí para producir la imagen de una puesta de sol o el sonido de la Quinta Sinfonía de Beethoven continúa siendo un misterio. La coordinación de las señales resulta fundamental. El inicio simultáneo de un impulso en varias neuronas del ojo hace posible la transmisión de los mensajes al centro de procesamiento visual en el cerebro. Imagen de Kenn Brown, Mondolithic Studios.



redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto 2012

PUBLICAR Y PERECER

«A la espera de la explosión», de Fred Guterl [Investigación y ciencia, agosto de 2012], aborda el problema planteado por la publicación de dos estudios en los que se investigaba el desarrollo de cepas del virus de la gripe H5N1 transmisibles entre mamíferos. Como científico, en un primer momento me mostré a favor de que se divulgasen todos los datos sobre el virus H5N1, pues ello facultaría a otros investigadores a proseguir sus proyectos y comunicar los resultados a sus colegas de profesión. Sin embargo, tras una reflexión más pausada, considero que no fue acertado publicar todos los datos, ya que la información así obtenida podría servir para que un grupo terrorista perfeccionase un arma biológica.

El problema podría haberse resuelto mediante una publicación parcial de los resultados que no revelase los aspectos esenciales; en concreto, la clase de modificaciones que deben realizarse en el virus para convertirlo en una variedad que pueda propagarse a través del aire. Tales métodos podrían haberse compartido con otros investigadores en casos puntuales, de manera que todos aquellos verdaderamente interesados en mejorar la salud pública pudiesen continuar examinando los datos.

La publicación de una versión truncada de los resultados habría satisfecho la necesidad científica de compartir datos a fin de prevenir futuras pandemias, sin comprometer con ello la seguridad de la población. Los tiempos actuales nos obligan a reevaluar y rediseñar la manera tradicional de compartir descubrimientos científicos en pos de un bien mayor.

Claude E. Gagna
Instituto de Tecnología de Nueva York

Erratum corrige

En el artículo del número de octubre «Control celular mediante luz», de Pau Gorostiza, en el último párrafo antes del apartado sobre fotosensibilización, debería leerse «...se han realizado experimentos fisiológicos en organismos vivos únicamente con luz; ahora se están ensayando en animales más complejos...».

FÓSILES DEMASIADO BRILLANTES

No cabe duda de que los dinosaurios se han vuelto mucho más atractivos durante las décadas que han transcurrido desde mi infancia. Me pregunto si los vívidos colores que decoran las ilustraciones de «El triunfo de los titanes», de Kristina A. Curry Rogers y Michael D. D'Emic [Investigación y Ciencia, septiembre de 2012] no habrán ido demasiado lejos. Entre las criaturas de hoy, ninguno de los animales terrestres de gran tamaño luce patrones de color tan elaborados. Y, en el caso de los más pequeños, aquellos han evolucionado como método de camuflaje, una estrategia de escaso o nulo éxito en un animal del tamaño de un elefante, por no hablar de uno como *Apatosaurus*.

John Byrne

Responden los autores: *Si decidimos «engalanar» con colores atractivos nuestras ilustraciones fue para reflejar en ellas la idea de que los saurópodos fueron animales muy dinámicos y de crecimiento rápido, con una combinación única de rasgos biológicos de ave y de reptil. Si bien es cierto que en la actualidad la mayoría de los animales de gran tamaño presentan tonalidades monótonas, algunos de ellos sí exhiben vivos colores (como las jirafas o las orcas, por ejemplo). En cuanto al camuflaje, la aparición de brillantes colores en un buen número de animales pequeños no responde a ese propósito, sino al de resultar útiles para el apareamiento, mostrar relaciones de parentesco o alertar del ataque de un depredador.*

Por último, debemos recordar que los saurópodos no nacían con el tamaño de un adulto (las crías no excedían el medio metro de longitud), por lo que sí eran vulnerables al ataque de los depredadores. Por supuesto, la coloración de la mayoría de los dinosaurios constituye en última instancia un tema abierto a la especulación. Sin embargo, algunos descubrimientos recientes han revelado la existencia de patrones cromáticos complejos en ciertos saurios provistos de plumas.

NÓBELES EN PEREGRINACIÓN

En el gráfico «Migraciones de medallas» [Investigación y Ciencia, octubre de 2012] se aprecia con claridad que la mayoría de los premios Nobel va a parar a EE.UU. Sin embargo, ¿cuántos de los galardonados nacieron y se formaron en otros países, para acabar emigrando a EE.UU. solo después? ¿Y qué parte de su labor desarrollaron mientras residían en esos otros lugares? Me siento orgulloso de ser estadounidense, pero no por ello debemos olvidar que EE.UU. es un crisol de pueblos.

Eric Pittelkau
Springfield, Virginia.



Octubre 2012

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

ECOLOGÍA

Robar para favorecer la biodiversidad



Hace miles de años, enormes animales parecidos a elefantes recorrían los paisajes, devorando la fruta y después defecándola. En el proceso, habrían sembrado las semillas de los bosques primitivos. Sin embargo, como hace mucho tiempo que esos animales se extinguieron, los ecólogos tienen que resolver un enigma: si siguen existiendo las mismas especies de árboles, ¿quién dispersa sus semillas en la actualidad para crear zonas boscosas?

La respuesta, al menos para un tipo de árbol, podría hallarse en las actividades «delictivas» de un astuto roedor. Expertos del Instituto Smithsoniano para las Investigaciones Tropicales en Panamá, de la Universidad de Wageningen y de otras instituciones afirman que, al asaltar repetidamente la comida almacenada en las madrigueras de sus congéneres, esos animales esparcieron las semillas por un territorio mucho más amplio de lo que antes se creía. La dispersión constituye un factor clave para asegurar la supervivencia de una especie, porque la presencia de individuos en una zona más extensa puede mitigar el efecto de epidemias, introducir la especie en nuevas áreas climáticas y aumentar el flujo genético entre poblaciones.

El roedor en cuestión es el agutí, un animal del tamaño de un gato doméstico con el aspecto de una ardilla sin cola. Los investigadores estudiaron, a lo largo de un año, el modo en que los agutíes almacenaban semillas de palmera negra en la isla Barro Colorado, en el canal de Panamá. Colocaron cámaras de vídeo en sus escondrijos, fijaron un largo hilo con un transmisor a 589 semillas y las rastrearon mediante las señales de radio que emitían. Más de la mitad de las semillas almacenadas fueron robadas por otros agutíes y almacenadas en otros lugares, a una distancia de hasta 280 metros de su situación original. Al final, los agutíes u otros pequeños mamíferos se comieron la mayoría de las semillas, pero un 14 por ciento de ellas llegaron a germinar. Los resultados se publicaron en el número del 31 de julio de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

El trabajo pone en duda la hipótesis acerca del papel esencial de la megafauna en la dispersión de las semillas hace miles de años, porque ya entonces habrían contribuido a ello los roedores. Uno de los autores del estudio, Ben Hirsch, de la Universidad estatal de Ohio, y sus colaboradores opinan que los resultados ofrecen cierta esperanza a los árboles afectados por las extinciones actuales de mamíferos. El hecho de que un humilde roedor pueda recoger el testigo de la extinta megafauna es una clara señal de la resistencia de la naturaleza.

—Daisy Yuhas

ACÚSTICA

La guitarra perfecta



Kazutaka Itako, ingeniero eléctrico del Instituto de Tecnología de Kanagawa, en Japón, toca la guitarra desde los seis años. Su hermano Satoshi, quien también posee formación en ingeniería eléctrica, es fabricante de guitarras. Ambos llevan tiempo investigando la forma óptima del instrumento.

Los expertos han dedicado una cantidad considerable de esfuerzo a entender la geometría y la acústica del violín. Hasta ahora, sin embargo, mucha menos atención había reclamado para sí el más popular de los instrumentos de cuerda. El trabajo preliminar de los hermanos Itako, que fue presentado en Hong Kong el pasado mes de mayo durante la conferencia internacional Acoustics 2012, se centra en el estudio de una sola variable: la profundidad de la caja.

Los Itako fabricaron cuatro guitarras casi idénticas con distintos espesores, comprendidos entre los 58 y los 98 milímetros. A fin de comprobar la calidad tonal y la de los armónicos de cada instrumento, un músico tocó las cuerdas al aire en dos estilos de rasgueo. La evaluación del sonido tuvo en consideración tanto mediciones objetivas como impresiones subjetivas. Los armónicos, o múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, fueron estudiados con ayuda de un osciloscopio (una onda «pura» posee un solo armónico, pero su sonido se considera estéril y artificial; un mayor número de armónicos, por el contrario, produce un sonido más rico). Por otro lado, nueve oyentes con formación musical juzgaron la calidad de los respectivos instrumentos.

La guitarra que emitió la mejor combinación de armónicos fue la que contaba con 68 milímetros de profundidad. Además, seis de los nueve oyentes la juzgaron como aquella con mejor calidad tonal. Los hermanos Itako se proponen ahora estudiar cómo afecta al tono el diámetro de la boca del instrumento, así como la posibilidad de emplear algún material sintético, como fibra de vidrio, para fabricar guitarras de tan buena calidad como las labradas en madera, puesto que la manufactura de estas últimas exige una gran cantidad de tiempo y maestría. Los Itako se han propuesto hallar una combinación de dimensiones y materiales que les permita diseñar un instrumento de alta calidad que permita a un mayor número de músicos aficionados procurarse buenas guitarras a precios asequibles.

—Evelyn Lamb

GABRIEL ROJO, MINDEN PICTURES (*agutí*); GETTY IMAGES (*guitarra*)

BIOLOGÍA

El arte como fuente de información científica

Hace unos años, mientras hojeaba un libro de arte antiguo, Paolo Guidetti descubrió un mosaico romano que ilustraba un pez enorme de cuya boca colgaban unas piernas de hombre. Sorprendido por la imagen, Guidetti, biólogo de la Universidad de Salento en Italia, reconoció el pez como la especie que estaba estudiando: el mero.

A los pescadores actuales les costaría encontrar un mero tan grande y tan cerca de la superficie del mar. La especie, que habita en todo el Mediterráneo, se halla en peligro de extinción. Si bien puede crecer hasta alcanzar más de ciento veinte centímetros y pesar hasta cuarenta y cinco kilos, la mayoría de los ejemplares son mucho más pequeños y, en las zonas de mayor presión pesquera, ocupan aguas demasiado profundas como para saltar fuera del agua y devorar a alguien.

Para contribuir a la recuperación de los meros, los administradores de pesquerías han establecido reservas marinas por todo el Mediterráneo. Los datos sugieren que la estrategia está funcionando: los meros se van haciendo más comunes a distintas profundidades y van aumentando de tamaño. Sin embargo, Guidetti y Fiorenza Micheli, bióloga de la Universidad Stanford, deseaban conocer con mayor precisión la abundancia del mero en otras épocas. Para determinar hasta dónde habría que llevar los esfuerzos para su recuperación, convendría saber cómo vivía hace miles de años.

Con ese propósito Guidetti y Micheli acudieron a los mosaicos que habían llamado la atención del primero. Buscaron en libros y museos. Corrieron la voz entre otros biólogos. Tardaron un par de años, pero lograron reunir 73 mosaicos etruscos, griegos y romanos de los siglos primero a quinto que mostraban peces o escenas de pesca. De ellos, 23 incluían meros.

A partir de los mosaicos, evaluaron el tamaño de los meros y la forma en que se pescaban. Lo que hallaron los sorprendió. En algunos mosaicos, los pescadores usaban redes y arpones para capturar meros en la superficie del agua, técnicas que nunca tendrían resultado hoy en día. Otros mostraban ejemplares tan grandes que justificaban sobradamente su reputación histórica de monstruos marinos. «Lo que observamos permitía deducir que los meros eran mucho más comunes y accesibles de lo que se pensaba», afirma Micheli, cuyos hallazgos se publicaron a finales del año pasado en *Frontiers in Ecology and the Environment.*

Dejando aparte las licencias artísticas y la conocida propensión a exagerar de los pescadores, Guidetti y Micheli defienden que esas fuentes antiguas y extracientíficas pueden ayudar a calibrar los objetivos de conservación y gestión. «Para cuestiones como esta, debemos estar dispuestos a considerar la importancia de datos menos cuantitativos y más anecdóticos», señala Micheli. «Queríamos subrayar la posibilidad de utilizar el arte como fuente de información.»

—Eric Wagner



GIANNI DAGLI ORTI, ART RESOURCE *(mosaico)*; UNIVERSIDAD DE CANTABRIA *(modelo 3D del Palacio de la Magdalena)*

Buena pesca: Un mosaico romano del siglo cuarto, con meros.

AGENDA

CONFERENCIAS

4 de diciembre
El sida, treinta años de infección: pasado, presente y nuevas terapias
J. M. Gatell, Hospital Clínico-IDIBAPS
Ciclo «Desafíos del siglo XXI. La voz de la medicina»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

11 de diciembre
Cannabinoides o maría. Algunas verdades y algunas leyendas
M. Isabel Martín Fontelles,
Universidad Rey Juan Carlos
Centro de Información Juvenil
Baena (Córdoba)
www.ciudadciencia.es

13 de diciembre
Arqueología y sociedad, una relación de pareja
Margarita Díaz-Andreu,
Universidad de Barcelona
Ciclo «Piedras y huesos»
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
blocs.iec.cat/arban > calendario

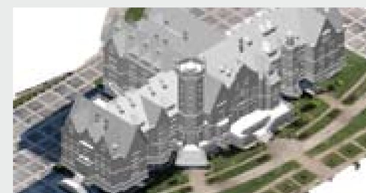
EXPOSICIONES

Los nóbel de física y de química en la biblioteca: 1901-1915
Biblioteca de física y química
Universidad de Barcelona
blocfiq.ub.edu

OTROS

3 y 4 de diciembre - Foro
Zeoforum: Innovación en zeolitas y materiales porosos ordenados
Universidad Politécnica de Valencia
zeoforum.com

12 de diciembre - Taller
Las geometrías no euclídeas y la comprensión del universo
Manuel de León, Instituto de Ciencias Matemáticas, CSIC-UAM-UC3M-UCM
Ciclo «Matemáticas en acción 2012»
Universidad de Cantabria, Santander
www.unican.es/campus-cultural



13 de diciembre – Tertulia literaria
Cáncer y cromosomas
Universidad de Vic
mon.uvic.cat/tlc

MEDICINA

Confusión sobre el colesterol

Hace años que se afirma que el «colesterol bueno», o lipoproteínas de alta densidad (HDL, por sus siglas en inglés), podría no ser tan bueno. Un estudio reciente demuestra, de hecho, que cierta subclase de HDL resultaría perjudicial al aumentar el riesgo de cardiopatía isquémica.

La causa de ello residiría en una pequeña proteína proinflamatoria, la apolipoproteína C-III (apoC-III). Su presencia en la superficie de las HDL podría casi doblar el riesgo de cardiopatías en hombres y mujeres sanos, según Frank Sacks, catedrático de prevención de dolencias cardiovasculares en la Escuela de Salud Pública de Harvard y autor principal de un estudio publicado en el número de abril del *Journal of the American Heart Association*. En el estudio se descubrió también que las HDL sin apoC-III conferirían una protección especial al corazón. Diversas investigaciones ya habían demostrado que las LDL (lipoproteínas de baja densidad, o «colesterol malo») con apoC-III en su superficie resultaban particularmente dañinas, al aumentar la frecuencia de formación de placas en las arterias. Pero, según Sacks, este es el primer estudio prospectivo a gran escala con participantes sanos donde se pone de manifiesto que la presencia de apoC-III en las HDL ejercería un efecto similar.

Los científicos examinaron muestras de sangre de 572 mujeres en el Estudio de Salud de Enfermeras y de 699 hombres en el Estudio de Seguimiento de Profesionales de la Salud, dos de las mayores investigaciones a largo plazo sobre los factores que afectan la salud de hombres y mujeres. Tras realizar entre 10 y 14 años de seguimiento, documentaron 634 casos de cardiopatía isquémica, que compararon con participantes control en cuanto a la edad, tabaquismo y fecha de obtención de la muestra sanguínea. Después de realizar los ajustes pertinentes para tener en cuenta esos factores y otros factores de riesgo cardiovascular relacionados con el estilo de vida, descubrieron que la presencia de HDL con apoC-III aumentaba el riesgo en casi el doble. Los hombres y mujeres cuyos niveles de HDL con apoC-III se hallaban en el 20 por ciento superior presentaban un 60 por ciento más de riesgo de sufrir cardiopatías que los del 20 por ciento inferior.

Sacks afirma que las técnicas empleadas por su equipo para medir la concentración de las dos subclases de HDL, que están siendo patentadas por Harvard, podrían dar lugar a pruebas más precisas para evaluar el riesgo de cardiopatías y la respuesta al tratamiento. Además, los resultados, si se corroboran en su estudio y en otros en curso, incentivarían el desarrollo de medicamentos que actuarían sobre las subclases de HDL, con el fin de aumentar los niveles de HDL sin apoC-III y reducir los de HDL con esta sustancia. Pero aún hay mucho que aprender sobre las HDL y sobre cómo actúan, afirma Nilesh Samani, de la Universidad de Leicester y coautor de un estudio que ha demostrado que una elevación de las HDL podría no afectar el riesgo de cardiopatías.

—Thea Singer

¿QUÉ ES ESTO?



Fantasma submarino: Alexander Semenov, biólogo marino y fotógrafo de las profundidades del mar, tomó esta imagen de *Caprella septentrionalis*, también conocido como «camarón fantasma». La especie, que puede medir hasta 3,2 centímetros de largo, pasa la mayor parte de su tiempo agarrada a algas, filtrando las partículas microscópicas que flotan a su alrededor para alimentarse de ellas. Pero cuando tiene que desplazarse, se mueve con un paso mesurado, arqueando el cuerpo de modo similar a como lo hace una oruga medidora. *—Becky Crew*

CORTESÍA DE ALEXANDER SEMENOV

INGENIERÍA

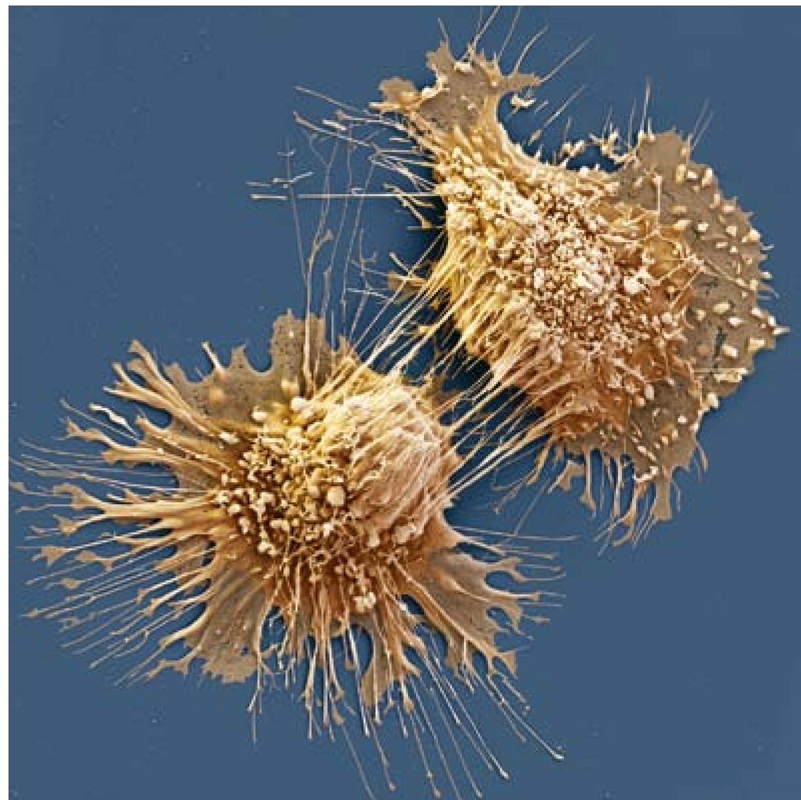
Cámaras ultrarrápidas para la detección del cáncer

Las células cancerosas que se desprenden de un tumor y causan metástasis provocan el 90 por ciento de las muertes por cáncer. Los investigadores llevan décadas intentando desarrollar un análisis de sangre que logre detectar esas células tumorales en circulación. Encontrarlas, sin embargo, viene a ser como buscar una aguja en un pajar: un mililitro de sangre contiene unos cinco mil millones de glóbulos rojos, casi diez millones de glóbulos blancos y, en su caso, apenas unas diez células tumorales.

Un grupo de investigadores de la Universidad de California en Los Ángeles ha diseñado una cámara que podría ayudar a identificar dichas células antes de que formen nuevos tumores; una posibilidad que incrementaría de manera notable la probabilidad de supervivencia del paciente. El ingenio fue descrito en el número de julio de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

El nuevo método se basa en una cámara microscópica ultrarrápida concebida en 2009, la cual toma unos seis millones de instantáneas por segundo. La técnica, conocida como microscopía amplificada por codificación en tiempo serial (STEAM, según sus siglas en inglés), crea imágenes gracias a un pulso láser muy corto, de apenas una milmillonésima de segundo. El tiempo de exposición asciende a 27 picosegundos ($27 \cdot 10^{-12}$ s), un millón de veces más corto que el de una cámara digital moderna.

El dispositivo convierte cada pulso de láser en una corriente de datos a partir de la cual puede reconstruirse una imagen de alta velocidad. Los investigadores incorporaron a la cámara un canal de microfluidos, a fin de que las células pasen por él, y un procesador de imágenes de alta velocidad que, según los autores, permite obtener imágenes nítidas. La técnica ha sido empleada para detectar células de cáncer de mama en muestras de sangre. «Estudiamos la forma, el tamaño y la textura de cada célula, así como las propiedades bioquímicas de su superficie», explica Keisuke Goda, autor principal del estudio. «Las células cancerosas suelen ser mayores que los glóbulos blancos o rojos. Y sabemos que su forma no se encuentra bien definida en comparación con la de estos», añade. En opinión de Goda, la posibilidad de detectar el cáncer mediante un sencillo análisis de sangre animaría a la gente a hacerse pruebas más a menudo.



Con las manos en la masa: Células cancerosas en división.

—Larry Greenemeier

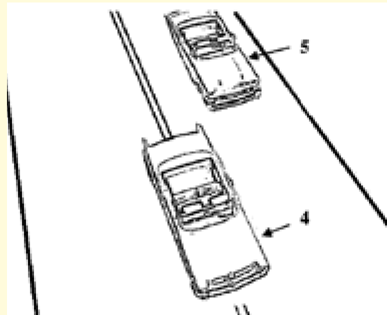
PHOTO RESEARCHERS, INC (*células cancerosas*); OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. (*patente*)

PATENTES

Retrovisores sin punto ciego: En algunos países, el espejo retrovisor del lado del copiloto lleva la advertencia de que los objetos «se sitúan más cerca de lo que parece», debido a que la superficie curvada del espejo, diseñada para que los conductores dispongan de un mayor campo de visión, distorsiona la distancia. En cambio, la normativa estadounidense exige que el espejo retrovisor del lado del conductor sea plano, porque se consideró que la percepción de la profundidad era más importante que el campo de visión en ese lado. El resultado es un punto ciego, justo detrás del hombro izquierdo del conductor. Mientras se esforzaba por hallar la forma en que un robot que juega al fútbol tuviese una visión de 360 grados, R. Andrew Hicks, matemático de la Universidad Drexel, descubrió el modo de que un espejo pequeño abarcase un campo de visión más amplio sin distorsión. Ese trabajo le inspiró la creación de un espejo retrovisor sin punto ciego para el conductor.

Después de años de perfeccionar algoritmos, Hicks obtuvo la patente número 8.180.606, que describe un espejo retrovisor para el lado del conductor con un campo de visión de al menos 45 grados, a diferencia de los espejos actuales, que abarcan solo entre 15 y 17 grados.

El algoritmo de Hicks emplea miles de cálculos para crear una «extraña superficie ondulada» que refleja cada rayo de luz hacia el conductor de la manera apropiada. Las curvas son sutiles, sin embargo, y el espejo parece liso. Hace muy poco tiempo que los fabricantes han desarrollado la técnica necesaria para dar forma a esa superficie. Antes de que puedan fabricarse vehículos con el nuevo espejo, deberá modificarse la normativa, pero el nuevo complemento podría comenzar como un accesorio de posventa en los próximos años. *—Marissa Fessenden*



MICROBIOLOGÍA

Nuestro segundo genoma

El estudio del metagenoma humano, el sinfín de genes de la comunidad microbiana que alberga nuestro cuerpo, ayuda a identificar los beneficios que nos aportan los distintos microorganismos

Desde su aparición hace unos 200.000 años, la especie humana —al igual que el resto de seres multicelulares, incluidos animales y plantas— ha vivido en íntima asociación con diversas comunidades microbianas. No hablamos de una infección pasajera, sino de una relación estable con géneros y especies microbianas claramente determinados. La estabilidad de la asociación durante milenios refleja la existencia de una adaptación mutua entre las distintas especies y el anfitrión. Además, indica que en la relación predomina la simbiosis o mutualismo, es decir, la asociación conlleva algún tipo de beneficio para las especies implicadas, incluido el anfitrión (las relaciones de pura patogenicidad son oportunistas y no perduran, bien porque se agota el recurso o bien porque la selección natural favorece los individuos resistentes).

Cada ser humano convive con un inmenso número de bacterias, protozoos, levaduras y virus. Estos se alojan de forma estable en la piel y en las cavidades corporales comunicadas con el exterior (fosas nasales, boca, tubo digestivo, vagina). Emerge por tanto una nueva concepción que entiende al ser humano como un «supraorganismo», compuesto no solo por sus propias células sino también por una multitud de células microbianas. Esa colectividad de microorganismos presenta un conjunto de genes que intervienen en numerosos procesos biológicos del anfitrión. La totalidad de los genes microbianos, distintos de los del anfitrión, se denomina metagenoma o microbioma humano, y constituye nuestro segundo genoma. Nuestra dotación genética es, por tanto, un agregado del propio genoma y del metagenoma [*véase* «El ecosistema microbiano humano», por J. Ackerman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2012].

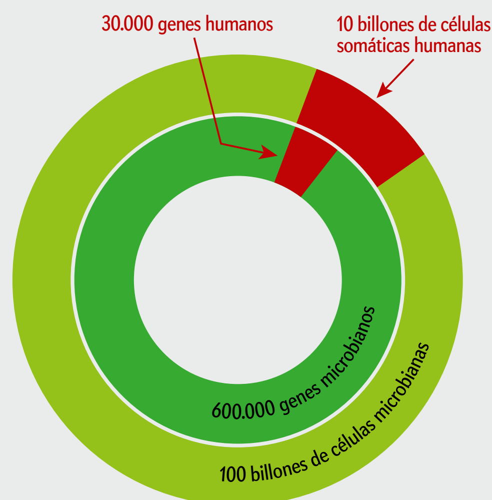
La microbiota intestinal

Las mucosas y la luz del tubo digestivo proporcionan el hábitat natural a una gran colectividad de comunidades microbianas. Se estima que el intestino humano alberga unos 100 billones de bacterias pertenecientes a entre 500 y 1000 especies distintas. El número de células bacterianas supera en 10 veces el de células somáticas. Los conocimientos adquiridos en años recientes permiten afirmar que las funciones del tubo digestivo, la nutrición y la defensa, dependen no solo de las estructuras propias (barrera mucosa, glándulas secretoras, sistema inmunitario de las mucosas), sino también de la presencia y actividad de las comunidades microbianas que colonizan el intestino. Estas constituyen la microbiota intestinal y representan un órgano más, perfectamente integrado en la fisiología del individuo.

A partir de datos experimentales obtenidos mediante estudios en animales con colonización intestinal controlada, se han identificado tres funciones primarias de la microbiota intestinal que resultan beneficiosas para los humanos. En primer lugar, como resultado de su actividad bioquímica, los microorganismos desempeñan funciones de nutrición y

HALLAZGOS

COMUNIDADES MÁS QUE HUMANAS



Cada persona constituye un «supraorganismo» compuesto no solo por células humanas (unos diez billones de células somáticas), sino también por una multitud de células microbianas (diez veces más que aquellas) que ocupan la piel, las superficies mucosas y las cavidades corporales comunicadas con el exterior. Las células somáticas contienen el genotipo del individuo, formado por algo menos de 30.000 genes (que constituyen el genoma humano), mientras que el conjunto de genes que aporta la colectividad bacteriana al individuo se estima en unos 600.000.

La diversidad del metagenoma intestinal

Genes no redundantes	3.299.822
Genes por individuo (media)	590.384
Genes comunes (en más del 50 % de individuos)	294.110
Genes raros (en menos del 20 % de individuos)	2.375.655

Mediante técnicas de secuenciación genética, el proyecto internacional MetaHIT ha elaborado el catálogo completo de genes que se alojan en el intestino humano. Su cifra asciende a más de tres millones y constituye el metagenoma intestinal. Este se caracteriza por una enorme diversidad: de la totalidad de los genes microbianos que alberga en promedio cada individuo, solo algo más de la mitad corresponde a genes comunes, presentes en más de la mitad de los humanos; los genes raros, los que se hallan en menos de la quinta parte de las personas, representan la mayoría del catálogo.

metabolismo, al favorecer la recuperación de energía en forma de ácidos grasos de cadena corta, la producción de vitaminas y la absorción de calcio y hierro en el colon. En segundo lugar, cumplen funciones de protección, ya que previenen la invasión de agentes infecciosos o el crecimiento excesivo de especies residentes con potencial patógeno. Y por último, realizan funciones tróficas, al controlar la proliferación y diferenciación del epitelio intestinal, así como el desarrollo y modulación del sistema inmunitario.

Especies y genes

Más de la mitad de los microorganismos que viven en simbiosis con el ser humano no son cultivables, por lo que no hemos podido identificarlos hasta el advenimiento de las técnicas de biología molecular, que detectan y analizan los genes bacterianos. A lo largo de las últimas dos décadas se han introducido diversas técnicas de ese tipo. Algunas de ellas se sirven de la diversidad de secuencias de un gen bacteriano, el *16S* de ARN ribosómico. Se trata de un gen altamente conservado (todas las bacterias poseen ribosomas) y su secuenciación ha permitido llevar a cabo estudios filogenéticos y taxonómicos y determinar la genealogía de géneros y especies.

En muestras de la mucosa y de la cavidad intestinal se reconocen secuencias del *16S ARNr* pertenecientes a ocho clases o divisiones del dominio biológico Bacteria, aunque el 90 por ciento de las secuencias pertenecen a tres clases principales: Firmicutes, Bacteroidetes o Actinobacteria. Cabe recordar que el dominio Bacteria está constituido por 55 clases, y que otros ecosistemas incluyen un número mayor de divisiones, como el suelo, donde habitan 20 clases de bacterias, o los reservorios naturales de agua. Sin embargo, las ocho clases bacterianas del intestino humano están representadas, cada una de ellas, por una inmensa variedad de géneros, especies y cepas. Como consecuencia, se observa una baja coincidencia de cepas entre personas distintas. Los estudios moleculares a nivel de especie o de cepa sugieren que cada humano muestra una composición bacteriana «personalizada», con unos pocos rasgos comunes entre distintos individuos. Un análisis exhaustivo de muestras de tres personas identificó 13.335 cepas distintas, de las que 7555 (el 57 por ciento) se hallaban presentes solo en una de las tres.

El estudio del gen *16S ARNr* permite la identificación taxonómica de bacterias, a nivel de clase, género, especie y cepa, de modo que se puede definir la composición de un ecosistema en cuanto a su diversidad, es decir según el catálogo censal de las bacterias presentes. Sin embargo, la lista taxonómica de la composición bacteriana puede aportar una escasa información desde un punto de vista funcional, ya que las bacterias comparten un gran número de genes y funciones aunque pertenezcan a distintos géneros o especies.

El estudio europeo Metagenomics of the Human Intestinal Tract (MetaHIT), en el que ha participado nuestro grupo, se planteó como objetivo secuenciar todos los genes microbianos del intestino humano y determinar su actividad biológica con el fin de conocer los parámetros que indican un funcionamiento intestinal normal o patológico (colitis ulcerosa, enfermedad de Crohn, obesidad).

Los avances en las técnicas de secuenciación, junto con la disponibilidad de instrumentos bioinformáticos que permiten identificar y clasificar funcionalmente las secuencias, están proporcionando datos muy novedosos e interesantes. Los principales resultados se han publicado en *Nature* en 2010 y 2011. MetaHIT ha definido el catálogo completo o casi completo de los genes microbianos que componen el metagenoma humano. El proyecto ha identificado en muestras de heces humanas más de tres millones de genes microbianos. En un porcentaje superior al 95 por ciento son de origen bacteriano; el resto corresponde a especies de virus o eucariotas (protozoos, levaduras).

En cada muestra individual se reconocen en promedio unos 600.000 genes microbianos. La mitad de ellos corresponden a genes presentes en la mayoría de los individuos. El estudio bioinformático del metagenoma ha identificado más de 20.000 funciones biológicas asociadas al catálogo completo (de más de tres millones de genes), 6000 de las cuales coinciden en todos los individuos. En definitiva, la composición bacteriana de la microbiota del intestino humano y su dinamismo funcional todavía hoy encierran muchos enigmas, pero esperamos que los instrumentos moleculares permitan avances importantes en los próximos años.

—*Francisco Guarner*
Servicio de aparato digestivo
Hospital Universitario
del Valle de Hebrón, Barcelona

PALEONTOLOGÍA

Pierolapithecus y la evolución de los homínidos

Se cumple el décimo aniversario del hallazgo de Pau, el simio antropomorfo fósil que ha contribuido a una mejor comprensión del origen y evolución de los homínidos

A finales de 2002, se iniciaban los trabajos paleontológicos asociados a las obras de ampliación del vertedero de Can Mata, en Els Hostalets de Pierola (Barcelona). El descubrimiento, décadas atrás, de algunos restos dentales aislados de hominoideos fósiles en la zona hacía albergar la esperanza de hallar nuevos restos de esos primates. Pero las previsiones más aventuradas muy pronto se vieron desbordadas por los acontecimientos.

Pocas semanas después de iniciar los trabajos, el 5 de diciembre de 2002, los paleontólogos descubrieron un cráneo de un homínido fósil de 11,9 millones de años. Las excavaciones posteriores, cuyos resultados se publicaron en *Science* en 2004, mostraron que se trataba del esqueleto parcial de un individuo macho, bautizado por la prensa con el nombre de Pau (en alusión a las movilizaciones de esa época contra la Guerra de Irak y por el doble significado de la palabra en catalán: «Pablo» y «paz»), correspondiente a un género y especie nuevos para la ciencia: *Pierolapithecus catalaunicus*. Desde entonces, los descubrimientos en el vertedero se han ido sucediendo uno tras otro. Se han identificado miles de fósiles de vertebrados terrestres, entre ellos dos géneros de hominoideos (*Anoiapithecus* y *Dryopithecus*). El esqueleto de *Pierolapithecus* sigue siendo, sin embargo, el más completo y el que nos proporciona mayor información. La conmemoración del décimo aniversario de su hallazgo parece un buen momento para recapitular lo que nos ha revelado sobre la evolución de los hominoideos, el grupo al que pertenecemos los humanos y nuestros parientes más cercanos, los simios antropomorfos.

¿Qué es un hominoideo?

Los hominoideos, que se caracterizan por carecer de cola externa (a diferencia de los monos), se originaron en África hace entre 30 y 25 millones de años. A lo largo de su evolución, experimentaron dos radiaciones adaptativas principales: una en África durante el Mioceno inferior (hace entre 23 y 16 millones de años) y otra en Eurasia durante el Mioceno medio y superior (hace entre 16 y 5 millones de años). Hace unos 9 millones de años, los hominoideos comenzaron a extinguirse en diversas regiones del globo a causa de cambios climáticos globales, de modo que hoy solo sobreviven en el África tropical y el sureste asiático (con la excepción de los humanos).

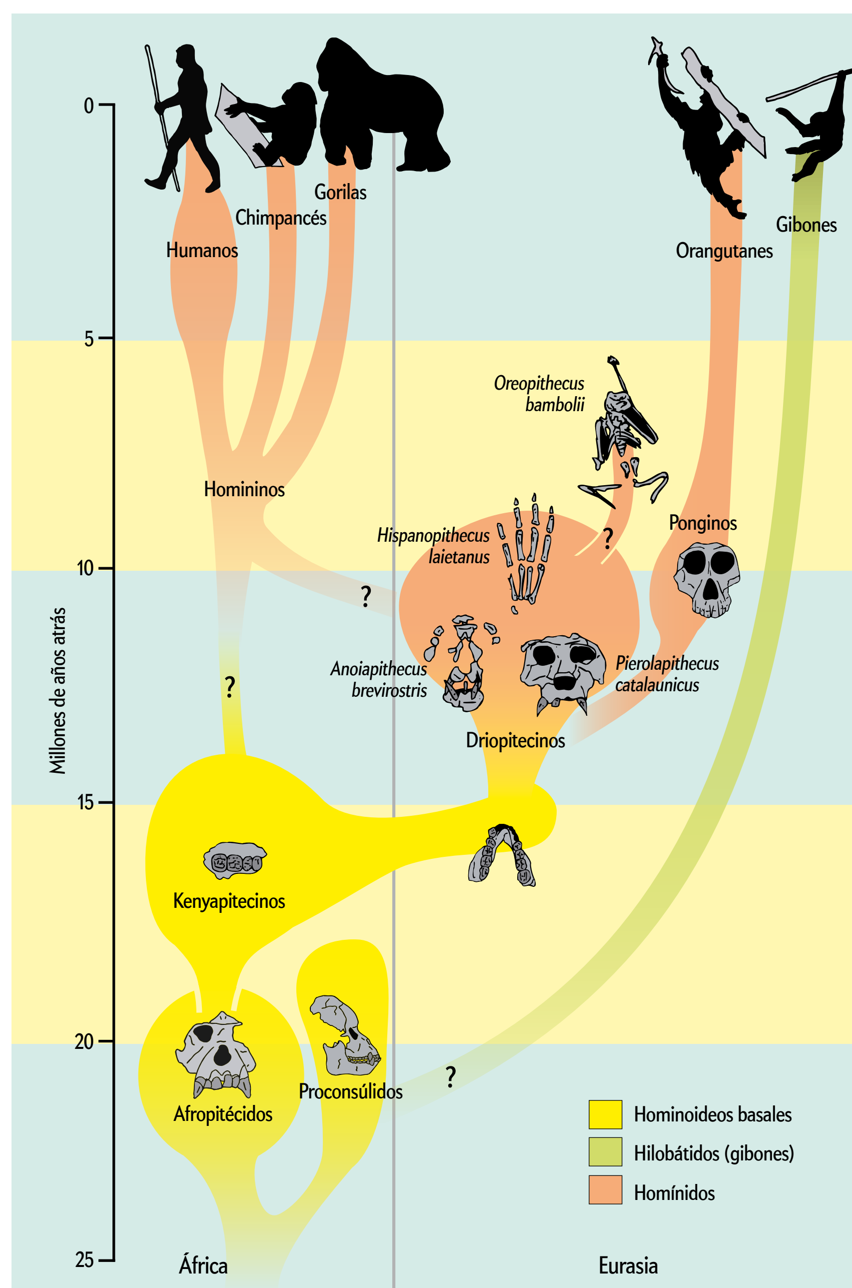
Se distinguen cuatro familias principales de hominoideos. Dos de ellas, los proconsúlidos y los afropitécidos, que se extinguieron, presentan una morfología craneal primitiva y un plan corporal pronógrado (cuadrúpedo). Se consideran hominoideos basales, esto es, anteriores a la divergencia de las dos familias actuales: los hilobátidos (pequeños antropomorfos, esto es, gibones y siamangs) y los homínidos (humanos y grandes antropomorfos, como orangutanes, gorilas y chimpancés). Los hilobátidos y los homínidos se caracterizan por poseer un plan corporal ortógrado (erecto), lo que resulta útil para practicar diversos tipos de locomoción con el tronco en posición vertical,



***Pierolapithecus catalaunicus*: Visión frontal y lateral del cráneo hallado en el vertedero de Can Mata (*a*); reconstrucción de la cara superpuesta a los restos óseos (*b*), y reconstrucción de su aspecto en vida, trepando a un árbol (*c*).**

MODIFICADO A PARTIR DE «*PIEROLAPITHECUS CATALAUNICUS*, A NEW MIDDLE MIOCENE GREAT APE FROM SPAIN». S. MOYÀ-SOLÀ ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 306, PÁGS. 1339-1344, 14 DE NOVIEMBRE DE 2004 (*fósiles*); © MEIKE KÖHLER (*reconstrucción de la cara*); MARTA PALMERO, © ICP (*Pierolapithecus trepando*)

Árbol evolutivo simplificado de los hominoideos. Los hominoideos se originaron en África hace entre 30 y 25 millones de años. A lo largo de su evolución, experimentaron dos radiaciones principales: una en África, hace entre 23 y 16 millones de años, y otra en Eurasia, hace entre 16 y 5 millones de años. Se distinguen cuatro familias principales de hominoideos. Dos de ellas, los proconsúlidos y los afropitécidos, que se extinguieron, presentaban un plan corporal prónogrado (cuadrúpedo). Las dos familias actuales, los hilobátidos (gibones) y los homínidos (humanos y grandes antropomorfos, como orangutanes, gorilas y chimpancés), se caracterizan por poseer un plan corporal ortógrado (erecto). *Pierolapithecus* y otros hominoideos fósiles del Mioceno europeo se clasifican en el grupo de los driopitecinos, dentro de la familia de los homínidos. (Los interrogantes denotan relaciones de parentesco inciertas.)



entre ellos la braquiación, la suspensión, la trepada o el bipedismo. Sin embargo, mientras que los hilobátidos presentan un cráneo esencialmente primitivo (más parecido a los hominoideos basales), los homínidos comparten una morfología craneal más evolucionada, caracterizada por una cara más alta y una región facial media (entre el puente de la nariz y las cuencas de los ojos) más plana.

El homínido *Pierolapithecus*

¿Qué posición ocupa *Pierolapithecus* en el árbol evolutivo de los hominoideos? Antes de su descubrimiento, los fósiles de hominoideos ibéricos del Mioceno medio (hace más de 11,1 millones de años) se hallaban representados por unos pocos dientes aislados. Si bien estos resultan de gran importancia para identificar las especies fósiles, no permiten ahondar en sus relaciones filogenéticas, o de parentesco, con las especies actuales. El descubrimiento de Pau cambió por completo el conocimiento que se tenía de los hominoideos fósiles europeos del Mioceno medio, ya que su cráneo y resto del esqueleto nos proporcionan una información muy valiosa para entender la evolución de este grupo.

A pesar de algunos caracteres craneales primitivos, *Pierolapithecus* ya presenta una cara alta y plana en su región media, lo cual indica que se trata de un homínido. Su morfología craneal se asemeja a la de otros hominoideos fósiles del Mioceno medio europeo (los driopitecinos), pero en cambio, no presenta claramente los rasgos más evolucionados de los dos grupos actuales de homínidos: los ponginos (orangutanes y sus parientes extintos) y los homininos (gorilas, chimpancés, australopitecos y humanos). *Pierolapithecus* suele considerarse un homínido basal, más derivado que los hilobátidos, pero anterior a la divergencia entre los ponginos y los homininos. Sin embargo, podría estar más emparentado con los primeros, como sugiere la semejanza de algunos caracteres internos del cráneo, entre ellos, la ausencia de seno frontal (un hueco en la parte media del hueso de la frente). Además, *Pierolapithecus* carece de algunas características de los homininos, más evolucionadas, como el torus supraorbitario (barra ósea prominente y continua sobre las cuencas de los ojos).

Hace entre 15 y 14 millones de años, representantes del grupo más primitivo de homínidos (los kenyapitecinos) se dispersaron desde África hacia Eurasia. *Pierolapithecus* y otros driopitecinos, como *Anoiapithecus*, muestran algunas similitudes con los kenyapitecinos: poseen muelas con esmalte grueso y carecen de un seno maxilar (un hueco en el hueso que sostiene los dientes superiores) bien desarrollado. Ello hace pensar que los homínidos eurasiáticos se originaron a partir de los kenyapitecinos, mientras que el

origen de los homininos sería aún objeto de debate. Cabe destacar que los kenyapitecinos muestran aún un plan corporal pronógrado, distinto del plan ortógrado característico de *Pierolapithecus*, lo cual plantea no pocos interrogantes sobre la evolución del aparato locomotor de los hominoideos en su conjunto.

Los orígenes de la ortogradía

Los hominoideos actuales cuentan con un plan corporal ortógrado, distinto del plan pronógrado típico de los monos y otros mamíferos cuadrúpedos, lo cual se refleja en múltiples adaptaciones esqueléticas (situación dorsal de los omóplatos, tórax ancho y poco profundo, pelvis ancha, etcétera). En *Pierolapithecus*, la posición bastante dorsal de los procesos transversos de las vértebras lumbares (pequeñas protuberancias óseas para la inserción de músculos y ligamentos), así como la marcada curvatura de las costillas, indican que el tórax era ancho y poco profundo, como en los hominoideos actuales. Ello encaja con el hecho de que el cúbito y los huesos de la muñeca no se articulaban entre sí, a diferencia de los monos cuadrúpedos, en los cuales el antebrazo tiene dos articulaciones con la muñeca. La pérdida de esta doble articulación en los hominoideos, documentada por primera vez en *Pierolapithecus*, se relaciona con la mayor capacidad de desviar la mano cuando trepan verticalmente. Todo ello indica que *Pierolapithecus*, como los hominoideos actuales, presentaba ya un plan corporal ortógrado, como cabría esperar dada su morfología craneal de tipo homínido.

Durante mucho tiempo, se pensó que los hilobátidos y los homínidos actuales habían heredado el plan corporal ortógrado a partir de un ancestro común, en el cual estos rasgos habrían evolucionado como adaptaciones para trepar y suspenderse. Sin embargo, *Pierolapithecus* carece de las adaptaciones suspensoras características de los hominoideos actuales (falanges de la mano largas y curvadas) y presenta, además, adaptaciones a la locomoción cuadrúpeda sobre las ramas, asemejándose así a los kenyapitecinos y los hominoideos basales. Ello indica que, en los homínidos, la ortogradía evolucionó en un principio para llevar a cabo comportamientos ortógrados no suspensores (como trepar verticalmente), y que solo más tarde se reaprovechó, en varios linajes de grandes antropomorfos, para la suspensión (o, en el caso de los humanos, para el bipedismo). Además, el mosaico de características locomotoras en *Pierolapithecus* también implica que los comportamientos suspensores evolucionaron de modo independiente en los hilobátidos y los homínidos, y abre la puerta a la posibilidad de que tales comportamientos también evolucionasen por separado en los ponginos, los homininos y los driopitecinos.

El origen independiente de la suspensión en diversos linajes de hominoideos no debería sorprendernos, puesto que los monos araña sudamericanos también han desarrollado adaptaciones suspensoras. Sin embargo, esta hipótesis implica un cambio de paradigma muy importante: si la suspensión surgió por evolución varias veces en distintos linajes debido a presiones selectivas similares, a la posesión de un mismo patrón ortógrado ancestral o a ambas razones, ¿qué otras características compartidas por hilobátidos y homínidos podrían haber evolucionado también de modo independiente? En otras palabras, ¿es la ortogradía homóloga en los hilobátidos y los homínidos (es decir, tiene un origen común), o ambos grupos se originaron a partir de distintos ancestros pronógrados?

Diez años tras su descubrimiento, el esqueleto de Pau ha desmentido el paradigma de que la suspensión apareció solo una vez durante la evolución de los hominoideos. Y si ello es posible, también lo es que la ortogradía en su conjunto se hubiese originado de modo independiente en los hilobátidos, los ponginos y los homininos. Según esta hipótesis, así como los driopitecinos y los ponginos se originaron en Eurasia a partir de ancestros pronógrados kenyapitecinos de origen africano, los homininos podrían haberse originado a partir de otros kenyapitecinos pronógrados que se quedaron en África. Solo el registro fósil podrá proporcionarnos, en el futuro, nuevas pistas para tratar de resolver esta cuestión. Esperemos que nuevos descubrimientos en el vertedero de Can Mata contribuyan a arrojar aún más luz sobre la evolución de nuestros parientes más cercanos, los simios antropomorfos.

—David M. Alba
—Salvador Moyà-Solà
Instituto Catalán de Paleontología Miquel Crusafont, Barcelona

MATERIALES

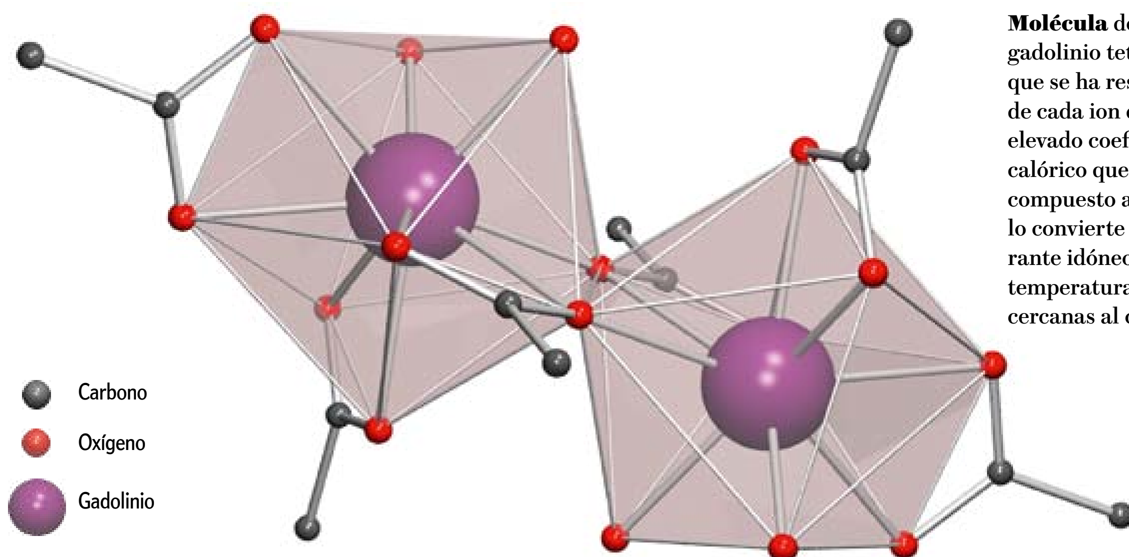
Moléculas que enfrían

Nuevos materiales magnéticos de base molecular prometen avances en las aplicaciones criogénicas

Una característica peculiar de los materiales magnéticos reside en que su temperatura puede variar como respuesta a la aplicación de un campo magnético externo. Este fenómeno, conocido como el efecto magnetocalórico (EMC), fue observado por primera vez en 1881 en el hierro metálico. Medio siglo más tarde, William F. Giauque logró alcanzar temperaturas cercanas al cero absoluto gracias al EMC de ciertas sales paramagnéticas, un resultado que en 1949 fue recompensado con el premio Nobel de Química.

Si bien todos los materiales magnéticos muestran EMC, solo algunos de ellos responden con los cambios de temperatura requeridos para las aplicaciones criogénicas. En general, la clave reside en encontrar el refrigerante óptimo para cada régimen de temperaturas. En una investigación reciente llevada a cabo por nuestro grupo y colaboradores de las universidades de Málaga y Edimburgo, hemos identificado un nuevo material magnético de base molecular que permite alcanzar temperaturas cercanas al cero absoluto con un EMC mucho mayor que el de las sustancias empleadas hasta ahora. El resultado ofrece nuevas posibilidades en el campo de la criogenia.

Al someter un material magnético a la acción de un campo externo, los pequeños dipolos que lo componen tienden a alinearse en la dirección del campo. En consecuencia, disminuye la contribución magnética a la entropía total del sistema. Si dicho proceso tiene lugar en condiciones adiabáticas (sin intercambio de calor con el entorno y, por tanto, sin variaciones en la entropía total), la reducción de la entropía magnética deberá verse compensa-



Molécula de acetato de gadolinio tetrahidrato, en la que se ha resaltado el entorno de cada ion de gadolinio. El elevado coeficiente magnetocalórico que exhibe este compuesto a nivel molecular lo convierte en un refrigerante idóneo para alcanzar temperaturas locales cercanas al cero absoluto.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

da por un aumento de temperatura. En el proceso inverso, el material se enfría cuando se reduce la intensidad del campo magnético aplicado. Estos fenómenos permiten diseñar un ciclo termodinámico cuyo efecto neto es la refrigeración del material [*véase* «Refrigeración respetuosa con el ambiente», por Lluis Mañosa y Antoni Planes; Investigación y Ciencia, febrero de 2011]. Aunque la desimanación adiabática fue el primer método que permitió alcanzar temperaturas del orden del milikelvin, el desarrollo durante los años setenta y ochenta de los refrigeradores basados en una dilución de ^{3}He y ^{4}He, que podían trabajar en ciclo continuo, provocó que la técnica cayese en desuso.

En los último años, sin embargo, la escasez de ^{3}He y las aplicaciones espaciales han reavivado el interés por la refrigeración magnética. La técnica resulta aplicable en ausencia de gravedad, por lo que ha sido considerada para enfriar los sensores de algunas misiones espaciales, como el observatorio Herschel, de la ESA, o los del telescopio de rayos X Astro-H, proyectado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial. Los estrictos límites de peso y volumen a los que se enfrentan las misiones espaciales invitan a investigar nuevas fórmulas para reducir el tamaño de estos dispositivos. Esto puede conseguirse disminuyendo la cantidad de refrigerante o la intensidad máxima del campo magnético. Una tercera posibilidad consiste en la refrigeración «en chip», en la que se enfría únicamente el sensor.

Magnetismo molecular

Ese objetivo puede alcanzarse gracias al magnetismo molecular. Durante las dos últimas décadas se han realizado grandes avances en la investigación de moléculas magnéticas, caracterizadas por poseer un momento magnético único y bien definido a nivel molecular. Se trata de sustancias solubles en disolventes comunes y cuyo carácter modular, que puede diseñarse durante la síntesis, abre numerosas perspectivas para «sintonizar» sus propiedades magnéticas.

Los átomos responsables del efecto magnetocalórico en dichas moléculas interaccionan entre sí mediante enlaces químicos que modulan la magnitud del fenómeno. A bajas temperaturas, esas interacciones dan como resultado un espín molecular neto S, cuya relación con el EMC queda determinada por la máxima variación de la entropía magnética, proporcional a $\ln(2S + 1)$. Esta circunstancia nos lleva a considerar interacciones ferromagnéticas, ya que entonces los espines atómicos se alinearán en un mismo sentido y el espín molecular resultante será máximo.

Además de un gran espín molecular, lograr un EMC elevado requiere que la anisotropía magnética sea relativamente pequeña. Ello se debe a los efectos que provoca el campo cristalino generado en el entorno de cada uno de los átomos magnéticos de la molécula, el cual establece una dirección preferente para el espín molecular. Si la anisotropía es acusada, la polarización de los espines moleculares resultará menos sensible a las variaciones del campo magnético externo; en consecuencia, para obtener un mismo EMC será necesario aplicar un campo magnético de mayor intensidad.

Nuestro trabajo, publicado en junio de 2011 en la edición internacional de *Angewandte Chemie*, ha permitido diseñar y sintetizar nuevas moléculas con un EMC muy elevado; mucho mayor que el de las aleaciones y nanopartículas magnéticas empleadas hasta ahora como refrigerantes de baja temperatura. Tal es el caso del acetato de gadolinio tetrahidrato, un material molecular de estructura simple. Los experimentos a bajas temperaturas realizados en nuestro laboratorio y el estudio teórico de sus propiedades han demostrado que dicho material posee un EMC extraordinariamente elevado incluso para pequeñas variaciones del campo magnético externo. Su novedad más destacable reside en el uso de ligandos químicos muy ligeros que, además, generan interacciones ferromagnéticas en el interior de cada molécula.

Los avances descritos permitirán el desarrollo de microrrefrigeradores integrados en el propio chip. Para ello, el refrigerante debe anclarse al microcircuito en forma de depósitos delgados o monocapas que preserven sus propiedades magnéticas; un objetivo que resulta factible con los nuevos materiales debido a su carácter molecular. Tales dispositivos mesoscópicos podrán utilizarse como plataformas refrigerantes en toda clase de instrumentos que necesiten operar a muy bajas temperaturas, como los detectores de rayos X y gamma en astronomía, ciencia de materiales o instrumentación de seguridad.

—Marco Evangelisti
—Agustín Camón
—Olivier Roubeau
Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón, CSIC y Universidad de Zaragoza

CALENTAMIENTO GLOBAL

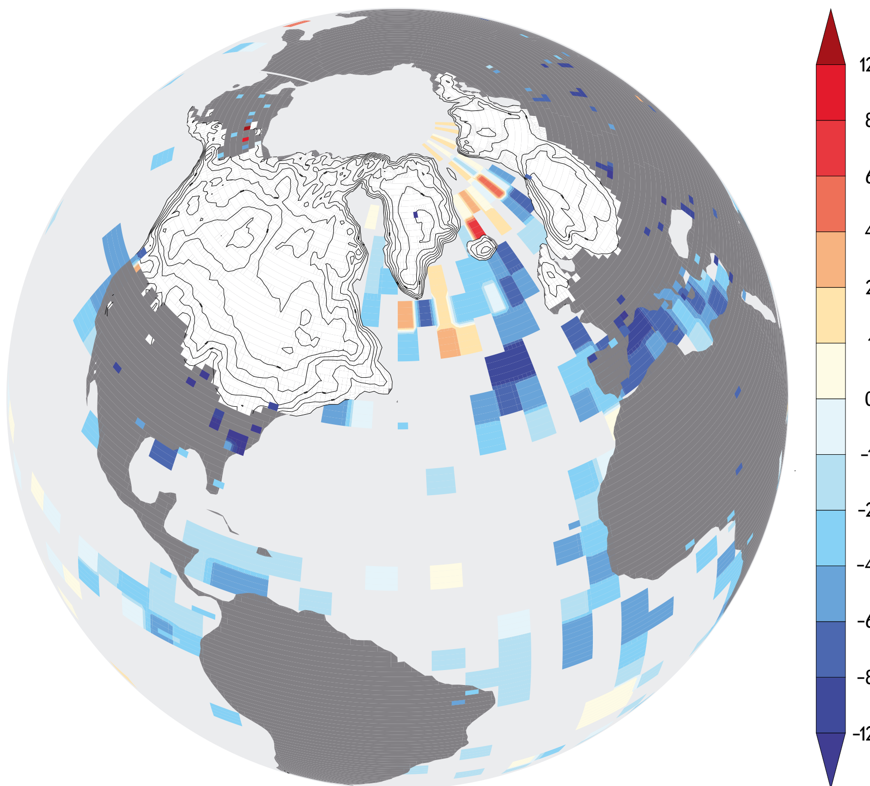
La sensibilidad del clima al dióxido de carbono

El estudio del último máximo glacial, hace 21.000 años, acota el aumento esperado de las temperaturas a causa del efecto invernadero

El clima de nuestro planeta está cambiando con rapidez desde hace décadas, un fenómeno que sin duda obedece a las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la quema de combustibles fósiles. La concentración atmosférica de este gas ha alcanzado niveles sin precedentes en los últimos 800.000 años. Se espera que los efectos adversos del cambio climático, como el aumento del nivel del mar o una mayor incidencia de sequías, se tornen más aparentes en un futuro próximo. Pero ¿cuánto se calentará el planeta? Se trata de una pregunta muy difícil de responder, ya que desconocemos el valor preciso de una de las variables básicas que rigen el clima terrestre: su sensibilidad climática. En ello radica la principal fuente de incertidumbre de las proyecciones climáticas que van más allá de unos decenios. Poco a poco, sin embargo, estamos logrando reducir la ambigüedad de la respuesta. En un artículo publicado en *Science* a finales de 2011 junto con otros colaboradores, referimos avances notables en esta dirección. Según nuestros resultados, el clima podría ser menos sensible al dióxido de carbono de lo que auguran algunas predicciones.

La sensibilidad climática estima el cambio producido en la temperatura media de la superficie del planeta cuando se perturba el equilibrio energético de la atmósfera. Para que la temperatura se mantenga estable, debe existir un equilibrio entre la energía que la Tierra recibe del Sol y la que radia hacia el espacio. Un 30 por ciento de la energía que incide sobre nuestro planeta es reflejada por la atmósfera, las nubes, el océano, la masa continental, el hielo y la nieve. El 70 por ciento restante es absorbido por la atmósfera, la hidrosfera y la superficie, las cuales, a su vez, lo reemiten en forma de radiación infrarroja. Parte de esta radiación saliente es absorbida por algunos de los gases presentes en la parte baja de la atmósfera —sobre todo, vapor de agua y dióxido de carbono—, lo que reduce las pérdidas radiativas de la superficie: un fenómeno conocido como efecto invernadero. En la actualidad, a causa del reciente incremento en la concentración atmosférica de gases como metano y dióxido de carbono, la temperatura global de superficie está aumentando y ajustándose a un nuevo valor de equilibrio.

La nueva temperatura de equilibrio dependerá del valor de la sensibilidad climática de equilibrio. Esta se define como el calentamiento promedio global que experimentaría la superficie del planeta si se doblase la concentración de CO_2 atmosférico, una vez que volviese a alcanzarse el estado estacionario. Dicho parámetro no puede medirse de manera directa, por lo que solo puede estimarse con modelos climáticos. Según el informe de 2007 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el valor más probable asciende a 3 grados Celsius, con una probabilidad del 66 por ciento de que se halle comprendido entre 2 y 4,5 ºC. Además, los estudios del IPCC asignan una pequeña probabilidad a valores superiores a los 10 grados. Algo así acarrearía consecuencias enormes a corto plazo. La incertidumbre de este tipo de predicciones no ha podido reducirse durante los últimos 32 años.



Valores relativos de las temperaturas superficiales del planeta durante el último máximo glacial, hace 21.000 años. La escala de colores indica si hubo un enfriamiento (*azul*) o un calentamiento (*rojo*) con respecto a las temperaturas modernas. La imagen, obtenida gracias a la metodología y los datos de diversas reconstrucciones paleoclimáticas empleadas por los autores, reproduce asimismo la localización de los principales casquetes glaciares.

ANDREAS SCHMITTNER

Mirar al pasado

Nuestras investigaciones predicen una sensibilidad climática notablemente inferior a la estimada por el IPCC. Para llegar a estos resultados, combinamos simu-

laciones climáticas con una reconstrucción de las temperaturas superficiales de todo el planeta durante el último máximo glacial, hace unos 21.000 años. A partir de mediciones muy precisas del aire atrapado en el hielo del casquete polar antártico, sabemos que en aquella época la concentración de CO_2 atmosférico ascendía a unas 185 partes por millón (ppm), menos de la mitad de los valores actuales (394 ppm en febrero 2012; los valores preindustriales del siglo XIX se calculan en 280 ppm). Numerosos datos paleoclimáticos muestran que el clima del último período glacial fue entre 3 y 4 ºC más frío que el de hoy, lo que dio lugar a la formación de enormes casquetes glaciares, un nivel del mar 120 metros inferior al actual, un clima árido con más polvo en la atmósfera y una distribución de los ecosistemas también muy diferente, típica de un clima frío. Dicho período resulta especialmente adecuado para realizar estimaciones sobre el efecto de los cambios en el CO_2 atmosférico en la temperatura del planeta. Ello se debe, entre otras razones, a que el clima se encontraba casi en equilibrio, lo cual contribuye a reducir los factores de incertidumbre; en particular, los asociados a la difusión del calor atmosférico en el océano.

De acuerdo con los resultados de nuestra investigación, la sensibilidad climática más probable asciende a unos 2,3 ºC. El estudio reduce también el grado de incertidumbre de la predicción: con una probabilidad del 66 por ciento, el incremento de temperaturas asociado a una duplicación del CO_2 atmosférico quedaría acotado entre 1,7 y 2,6 ºC. Además, se descartan calentamientos por encima de los 6 ºC. La validez de nuestros resultados se apoya en el supuesto de que los datos del clima pasado pueden emplearse para predecir comportamientos futuros, así como en la fiabilidad del modelo utilizado —en líneas generales, más simple que los del IPCC—. De ser el caso, podríamos descartar los escenarios catastrofistas que consideran cambios extremos inminentes, lo cual ayudaría a optimizar el diseño de estrategias de adaptación al clima futuro.

Con todo, nuestras investigaciones confirman que el clima se está calentando y que dicha tendencia proseguirá en todo el planeta. Los datos paleoclimáticos demuestran que pequeñas variaciones en las temperaturas globales provocan cambios notables, como un calentamiento superior al de la media en las superficies continentales de latitudes medias y bajas, el deshielo de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar y modificaciones en la vegetación y los ecosistemas.

Tales transformaciones tendrían lugar aunque detuviésemos por completo las emisiones de gases de efecto invernadero, algo que no tiene visos de suceder. Los datos del Observatorio de Mauna Loa, gestionado por la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA) de Estados Unidos, muestran que durante los años sesenta del siglo pasado la concentración media de CO_2 aumentó a un ritmo inferior a 1 ppm al año. Después ha ido creciendo progresivamente, hasta alcanzar las 1,6 ppm al año entre 1992 y 2001, y las 2,07 ppm al año en la última década. Una emisión continua de dióxido de carbono podría provocar un calentamiento medio global de entre 2 y 4 ºC antes de finales de siglo.

—Antoni Rosell
Investigador ICREA
Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales
Universidad Autónoma de Barcelona
—Andreas Schmittner
Facultad de ciencias oceánicas y de la atmósfera
Universidad estatal de Oregón

ESTADO DE LA C

LAS COLABORACIONES CIENTÍFICAS ENTRE PAÍSES DAN MEDIDA DE SU CAPACIDAD CREATIVA

John Sexton

Cuando Mijaíl Gorbachov permitió que Andréi Sájarov viajase a Estados Unidos, una de las primeras instituciones que visitó el famoso físico nuclear fue la Academia de Ciencias de Nueva York. En 1988, los miembros de la Junta de Gobierno de la academia habían encabezado la movilización de la comunidad científica para exigir la libertad de Sájarov, y este deseaba agradecerles todos sus esfuerzos.

La anécdota ilustra lo mucho que ha cambiado el mundo en el último cuarto de siglo, en especial el mundo científico. En los tiempos de la liberación de Sájarov, los países que perseguían investigaciones de calado se contaban con los dedos, y menos eran aún los que permitían estudios independientes de los intereses del Estado. Los investigadores, en la medida en que su trabajo requiriese colaborar con colegas de allende sus fronteras nacionales, tenían que salvar serios obstáculos para conseguirlo. La situación actual es bien diferente.

La globalización (que a veces denomino «planetización», para hacer hincapié en la amplitud del fenómeno) constituye un rasgo definitorio de la actual era de la historia humana. El historiador John Coatsworth la describió en 2004 como «lo que ocurre al acelerarse los movimientos de personas, bienes o ideas entre países o regiones», un proceso que ha venido produciéndose en diversas formas desde que los humanos modernos se aventuraron a salir de África. Pero ahora está sucediendo algo diferente: el mundo se está jibarizando. Ya no cabe ponerse a salvo de los acontecimientos que tienen lugar en tierras lejanas, sean económicos, políticos o intelectuales. La sociedad global opera como una red de creatividad e innovación en la que un conjunto de «capitales de ideas» define los nodos principales de la red. Si en la Italia renacentista el talento se movía entre Milán, Venecia, Florencia y Roma, en nuestros días las personas más creativas e innovadoras saltan con facilidad entre Silicon Valley, Shanghái, Londres y Nueva York.

Los científicos, desde Aristóteles hasta Stephen Hawking, siempre han querido actuar sin restricciones de soberanía. La ciencia, de modo intrínseco, se resiste a verse confinada entre fronteras. Las teorías de Copérnico sobre el sistema solar dieron paso a los descubrimientos astronómicos de Galileo, que dejaron expedito el camino para la teoría de la gravitación universal de Newton. Mas no hay que olvidar que esos grandes progresos, tan íntimamente relacionados, requirieron siglos. En casi toda la historia, el desarrollo de los saberes científicos, aunque constante, ha sido lento y se ha visto afectado por la distancia física entre los expertos, las restricciones de acceso a la educación, la carencia de recursos y las interferencias políticas. Ahora, el paso al que avanza la innovación se ha acelerado extraordinariamente.

Alianzas mundiales. El gráfico ilustra las colaboraciones entre los 25 países de mayor producción científica, según los artículos publicados en 2011 en un selecto grupo de revistas. No se han contado las colaboraciones internas en cada país.

IENCIA GLOBAL



EE.UU.
BRASIL
AUSTRALIA
CHINA
TAIWÁN
HONG KONG
INDIA
ISRAEL
JAPÓN
COREA DEL SUR
RUSIA
SINGAPUR
AUSTRIA
BÉLGICA
DINAMARCA
FINLANDIA
FRANCIA
ALEMANIA
ITALIA
HOLANDA
ESPAÑA
SUECIA
SUIZA
REINO UNIDO
CANADÁ

FUENTES: DIGITAL SCIENCE; MARTIN SZOMSZOR, DIGITAL SCIENCE (*datos*); SVEN LAQUA Y ARNO GHELFI (*gráficos*)



John Sexton fue nombrado decimoquinto rector de la Universidad de Nueva York en 2001. Presidió la Junta de Gobierno de la Academia de Ciencias de Nueva York de 2007 a 2011, de la que es presidente honorario.

Los indicadores de la actividad investigadora dan fe de una explosión en la capacidad científica, amén de una vigorosa tendencia hacia la colaboración internacional. Considérense estos datos: en 1996, un 25 por ciento de los artículos científicos estaban escritos por autores de dos o más países; ese valor ha superado hoy el 35 por ciento. El porcentaje de publicaciones firmadas por estadounidenses y colaboradores foráneos casi se duplicó entre 2006 y 2008 (del 16 al 30 por ciento). Los chinos publicaban en 2008 casi seis veces más que en 1996; hoy, el 10 por ciento de los artículos de todo el mundo proceden de China. En 1989, Corea del Sur no constaba entre los diez países que más solicitudes presentaban, a la Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU.; ahora ocupa el tercer puesto. Turquía, desde 1995, casi ha sextuplicado los recursos destinados a I+D, y el número de sus investigadores ha aumentado un 43 por ciento. La lista continúa, y todas las cifras nos llevan a reconocer que se ha producido un cambio sísmico en el alcance y amplitud de los estudios científicos, que trascienden las fronteras nacionales y se realizan en países sin representación previa en la ciencia de primer orden.

Aunque los investigadores no sean del todo conscientes de la globalización, la actividad científica está permeada por sus muy diversas formas. La rapidez y la facilidad con las que ahora nos comunicamos han acelerado tanto la circulación de ideas que los proyectos están hoy más interconectados que nunca. Y aunque la mayor conectividad no altere la esencia de la ciencia —la búsqueda del saber y el progreso de la humanidad— su globalización ha creado un ecosistema intelectual más abierto que incluye en sus diálogos a más interlocutores cultos.

Dos ejemplos. Uno de los grandes avances recientes para combatir la malaria es un fármaco llamado artemisinina. En septiembre pasado fue concedido el premio Lasker-DeBakey para la investigación médica clínica a uno de los científicos chinos que dirigió el desarrollo del medicamento. Pero, en realidad, la artemisinina había sido descubierta en China hace unos cuarenta años, por exigencia personal del presidente Mao Tse-tung, quien deseaba ayudar a Vietnam del Norte en la guerra contra EE.UU. El aislamiento de China y de sus científicos retrasó siete años la noticia del crucial hallazgo y demoró la disponibilidad del fármaco muchos años más. En los años cuarenta del siglo xx, Max Delbruck, biofísico germanoestadounidense, y Salvador Luria, microbiólogo italiano, colaboraron en un experimento paradigmático en el que demostraron que la resistencia bacteriana a los virus se heredaba por vía genética. Se trataba de una investigación de gran profundidad, y esos expertos se comunicaban a través del instrumento más fiable y eficaz de sus días: el servicio postal.

Pero gracias a Internet y a las redes sociales, el concepto de «comunidad» se entiende hoy de otro modo. Estamos mucho más habituados a establecer contacto intelectual con extranjeros; ampliamos la bolsa de talentos mediante nuevos y más eficaces procederes, y creamos relaciones mucho más profundas con nuestros colaboradores. Los descendientes científicos de los protagonistas de esas historias muy probablemente utilicen Skype, Facebook o redes compartidas. El volumen de datos crece mucho más deprisa; se integran en el diálogo más investigadores, e incluso no profesionales, y la cantidad de datos que se pueden recopilar, revisar y procesar es enorme. Esas diferencias hacen redefinir los conceptos de «colaborador» y «colega». Los matemáticos de las universidades de Nueva York tienen con sus colegas de Shanghái o Abu Dabi casi la misma cercanía que con los de su mismo pasillo en la facultad, y entre unos y otros campus universitarios se comparten resultados por los medios más punteros.

A consecuencia de la interconectividad, la ubicación física importa menos que nunca. Un estudio sobre las diferentes formas en que las personas procesan sus idiomas resultará más robusto si se realiza en múltiples lugares. Los investigadores de Nueva York que deseen analizar los campos magnéticos cerebrales mediante dispositivos muy sensibles pueden ubicar los aparatos en otro país donde no sufran las interferencias del metro. Con independencia del proyecto, los expertos de distintos lugares pueden superar las limitaciones que impone el horario laboral. Los científicos son extraordinariamente diligentes en su trabajo, y cuando tienen un experimento en curso, a menudo acuden de noche a su laboratorio o prescinden de las vacaciones. Al operar en laboratorios de diferentes zonas horarias, los estudios pueden proseguir veinticuatro horas al día y se logran resultados con mayor rapidez. Los equipos internacionales aprovechan cada vez más las franjas horarias mundiales para facilitarse el trabajo.

Esa comunicación dinámica e independiente de la distancia ha modificado profundamente los proyectos de investigación. Han aflorado cuestiones hasta ahora no consideradas o no examinadas. Figuran en esta categoría el cambio climático, la seguridad alimentaria y ciertos problemas humanitarios, como la crisis del agua y las enfermedades tropicales. En los programas de investigación nacionales, esos temas tal vez reciban una atención menor; en cambio, adquieren máxima prioridad en los que se realizan a escala global. No se trata, pues, de que la mera rapidez y sencillez de las comunicaciones hayan promovido la creación de equipos internacionales; ocurre también que la creación de tales grupos ha dado forma a las propias preguntas, con lo que han pasado a un primer plano problemas científicos que conciernen a toda la humanidad.

Para emprender muchos de esos proyectos, no hay más opción que realizarlos a escala global. El análisis de la variación del nivel del mar, o de los acuciantes problemas de gestión de las ciudades en un mundo cada vez más urbano, solo cobra sentido si se lleva a cabo en todo el planeta. Tales proyectos exigen recabar datos de distintos países y después organizar los recursos intelectuales y materiales de formas no concebibles hace un mero cuarto de siglo. De no ser por la tremenda capacidad con la que hoy se cuenta, resultaría imposible una empresa de tal envergadura.

A medida que ha ido aumentando la aportación de talento de distintos países, la comunidad científica mundial se ha vuelto menos dependiente de EE.UU. y de la ciencia occidental. Numerosas naciones ven en la ciencia y la tecnología los instrumentos desde los que erigir su economía; elevan las partidas de I+D en sus presupuestos, lo que, a su vez, produce colaboraciones más robustas con expertos de otros países. De este modo, está

FUENTE: NYU PHOTO BUREAU/MADERE

aumentando en Asia, y de forma especial en China, el número de doctorados en ciencias o en ingeniería; en cambio, en EE.UU. esa cifra está disminuyendo. Hace quince años, el número de artículos científicos publicados por EE.UU. decuplicaba el de China; los científicos chinos pasaban casi inadvertidos en las revistas. Pero hace un par de años, el país ya ostentaba el segundo puesto mundial en esa clasificación, y podría ponerse por delante de EE.UU. en 2013. A lo largo del decenio pasado, China, India y Brasil han duplicado holgadamente sus respectivas partidas en investigación y desarrollo, con lo que su contribución a la inversión mundial en I+D ha aumentado del 17 al 24 por ciento. En 2010, un informe de la Oficina de Patentes de EE.UU. señalaba que el predominio estadounidense en el número de patentes registradas dio fin en 2008, año en que encabezaron esa posición otros países. Y un informe de Thomson Reuters señalaba que, en 2011, China había superado a EE.UU. y a Japón en cuanto a las nuevas solicitudes.

La intensificación de la actividad científica en todo el planeta ha sido, ciertamente, para bien. La globalización, como resulta manifiesto por las colaboraciones internacionales en proyectos de gran envergadura, ya se da por hecha. El Proyecto Genoma Humano, la Estación Espacial Internacional, el Gran Colisionador de Hadrones del CERN y el ITER constituyen tan solo algunos ejemplos.

Sin embargo, hemos de ser cautos y no congratularnos demasiado. A pesar de la agilidad de las comunicaciones y de la creciente cohesión de la comunidad científica, existen riesgos y dificultades considerables. Muchos emanan de una gran tensión de nuestro tiempo: a la par que el mundo se vuelve cada vez más conexo, los individuos y las instituciones han buscado nuevas formas de alzar fronteras.

A pesar de que haya aumentado el número de participantes en las cuestiones científicas, muchos siguen siendo excluidos. En todo el mundo hay quienes no han podido acceder a la revolución de las telecomunicaciones ni a Internet, y aún menos a una educación superior o a conocimientos técnicos. Mientras se den esas circunstancias, serán muchas las personas de talento ausentes en importantes diálogos. El verdadero peligro estriba en que esa tendencia se refuerce a sí misma y que la brecha entre la capacidad científica de los países desarrollados y los menos desarrollados, en lugar de cerrarse, se ensanche.

MUCHOS PAÍSES VEN EN LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA LA FORMA DE ERIGIR SU ECONOMÍA, POR LO QUE AUMENTAN LAS ASIGNACIONES PARA I+D

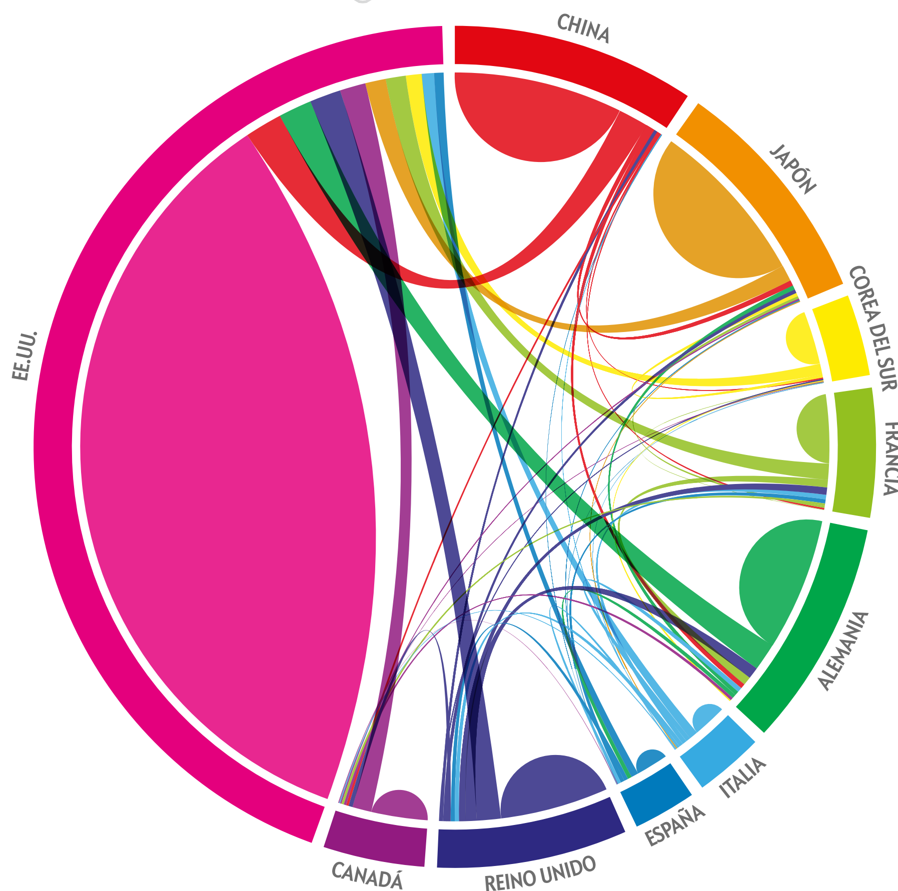
Tampoco debemos perder la capacidad de escuchar la voz de científicos marginales que desafían ortodoxias. Algunos de los más grandes progresos nacieron ahí. Dicho de otro modo, necesitamos tener bien presentes los peligros del pensamiento grupal o apresurado. Mientras que las nuevas tecnologías ponen en contacto a académicos, investigadores e incluso a no científicos, de un modo notoriamente eficiente y benéfico, esos medios y nuevas comunidades virtuales pueden reforzar el saber establecido. Necesitamos también tener más claras las ideas sobre la propiedad intelectual. La sospecha de que los frutos de la investigación no serán debidamente respetados en otros lugares podría perjudicar en gran medida la colaboración y el desarrollo de ideas nuevas.

Por otra parte, las políticas de inmigración pueden dificultar o impedir los proyectos a escala global. Aunque la colaboración y la comunicación nunca hayan sido más fáciles, numerosas universidades se enfrentan a obstáculos, cada vez más graves, para lograr permisos de inmigración. Hay colaboradores que no pueden obtener visados, o estudiantes de posgrado aceptados en los programas de doctorado pero a quienes no se les permite la entrada por su nacionalidad. No hay duda de que la seguridad nacional es de máxima prioridad para EE.UU. y otros países occidentales, pero resulta necesario equilibrar unos y otros principios si pretendemos una participación plena en una comunidad científica mundial.

Incluso en las instituciones científicas consolidadas persisten tensiones inquietantes que son exacerbadas por la globalización. Y aunque algunas de las más excelentes universidades estadounidenses están reformando su arquitectura interna en respuesta a la globalización, las instituciones con más experiencia en operar a escala mundial son las corporaciones multinacionales. Universidades y empresas se han ido aliando cada vez más, al ir aumentando la financiación de las investigaciones por las corporaciones. Esta alianza plantea problemas que requieren la atención de la comunidad científica. Primero, dado que las universidades dan prioridad al progreso del saber, en ellas se alienta la ciencia fundamental, que no pocas veces ha dado lugar a progresos extraordinarios, aunque impredecibles. Pero como las empresas persiguen resultados y productos concretos, su interés por la investigación fundamental pasa a un segundo plano. Por ello, en la medida en que la subvención de los estudios se vincule a los intereses de las compañías, se producirá una lamentable reducción de la inversión en la investigación básica. En segundo lugar, la financiación empresarial puede estar subordinada a la obtención de ciertos resultados. Algunas compañías farmacéuticas han manipulado los estudios y han ofrecido datos dudosos sobre la eficacia de un compuesto.

No me refiero a que la ciencia deba renunciar a la financiación de las corporaciones. Pero una gran multinacional, al operar allende la soberanía, ostenta un enorme poder, y no debemos olvidar que, en ciencia, lo que manda es el saber. Asimismo, hemos de reforzar las estructuras y procesos concebidos para proteger el progreso científico.

El auge de los proyectos cooperativos resulta beneficioso, entre otros motivos, porque ha animado a los Gobiernos —los occidentales y, cada vez más, los orientales— a dedicar importantes recursos a la investigación. Los incentivos para formar parte de equipos multinacionales, sin embargo, pueden esfumarse si no se cuidan ciertos aspectos básicos. Uno de ellos consiste en determinar si un científico dedicado a un proyecto, o a varios proyectos relacionados entre sí, puede recibir la ayuda de más de un estado. En caso afirmativo, hay que plantearse si esos países podrán ser cualesquiera o solo los aliados políticos. En la actualidad, numerosas universidades podrían



Colaboración interna: El gráfico representa las colaboraciones dentro de cada país y entre las diez naciones que más artículos publican. Los estadounidenses se asocian mucho más entre sí que con foráneos.

optar a importantes subvenciones de países del Medio Oriente o de Asia, pero las normas estadounidenses que regulan la asignación de las ayudas (sobre todo, las normas vinculadas a las exportaciones) hacen que muchos de esos proyectos cofinanciados resulten difíciles, si no imposibles, de realizar. Cabe preguntarse si esas políticas restrictivas aportan ventajas a la ciencia. Y valorar el riesgo de que, aplicadas al pie de la letra, dejen aislados a los científicos de EE.UU. Por otra parte, deberá quedar claro a quién pertenece la propiedad intelectual del fruto de las colaboraciones multinacionales y, en especial, las financiadas por más de un Estado: si se trata de una mera cuestión contractual entre los organismos participantes o bien tienen derecho los Gobiernos a reclamar esa propiedad, ya que sufragan una parte (quizá no cuantificable) del proyecto.

A la par que las fuerzas de la globalización vayan definiendo la trayectoria de la indagación científica de nuestro siglo, esas cuestiones, de tan amplio espectro, determinarán el rol y el valor de la ciencia en nuestras vidas. ¿Deberá estar abierta la investigación a todos o solo a los privilegiados? ¿Atenderá a necesidades de alcance mundial o solo a intereses particulares? ¿Aceptará la comunidad científica ideas revolucionarias o se basará en el conocimiento tradicional? ¿Permanecerán los países anclados a normativas trasnochadas o mostrarán la flexibilidad suficiente para permitir profundas colaboraciones?

El acceso al debate sobre la ciencia, de amplitud mundial, nunca ha sido tan grande, y ha hecho de la participación y el progreso un ejercicio en meritocracia. Las conversaciones dinámicas abren oportunidades sin precedentes para aprender, cuestionar principios y abatir los muros entre las disciplinas y especialidades. Pero no debe olvidarse que la trayectoria no siempre resulta ascendente. Hemos de cuidar que lo sea.

No es casual que el Renacimiento fructificase en tantos de los descubrimientos que todavía configuran nuestras vidas. Las ciudades estado se convirtieron en capitales de ideas y en ellas se congregaron las mejores inteligencias de la época. Surgieron así comunidades de individuos que se interrogaban sin cesar sobre nociones existentes, comunes y aceptadas. Al cabo, los participantes alcanzaron una independencia suficiente que les permitió consagrarse únicamente a la verdad. No menor ha de ser nuestro ideal ahora.

Esto nos retrotrae a Sájarov y hace plantearnos por qué había tantos científicos entre los principales soviéticos disidentes. Una de las razones es que la ciencia creaba una oportunidad para que sobresalieran los individuos más brillantes, a pesar de las privaciones y el control burocrático estatal. Los científicos, por la naturaleza de su trabajo, mantenían cierto contacto con la comunidad internacional. Y quizá más importante aún: la indagación científica estimula e induce un grado de rigor intelectual que lleva, de forma natural, a oponerse a sistemas corruptos y despóticos.

No es otro el caso de Alaa Al Aswany, aclamado novelista egipcio y uno de los principales críticos del depuesto régimen de Mubarak. Aparte de su actividad literaria y de sus opiniones sobre el futuro de Egipto, es odontólogo y ostenta una titulación avanzada de la Universidad de Illinois. En un perfil biográfico suyo publicado en *The New York Times* apuntaba que sus tres años de estudio en EE.UU. representaron el período más importante de su vida. Admite que tenía una visión distorsionada del país, pero sus viajes y descubrimientos —entre otras cosas, de una iglesia para homosexuales y de una organización que defiende el orgullo negro— le habían hecho ver que no solo se reducía a una nación que ejercía el imperialismo en el mundo árabe.

Además de los beneficios de los descubrimientos que genera la ciencia globalizada, la difusión de la formación e investigación científica será inseparable de la apertura y el entreverado de las sociedades de todo el planeta. Ningún país podrá prescindir de las ventajas de la ciencia y, a la par que forma a los jóvenes en sus universidades, estará creando una clase que piensa a escala mundial, que exige instituciones responsables y prospera pese a los obstáculos locales. Esos nuevos líderes, en la tradición de Sájarov, van a constituir la vanguardia de la siguiente etapa de la globalización.

FUENTES: DIGITAL SCIENCE; MARTIN SZOMSZOR, DIGITAL SCIENCE

Stefan Theil es periodista afincado en Berlín. Ha trabajado como redactor de economía europea para *Newsweek*.



DE LA UNIVERSIDAD A LA INDUSTRIA: EL ÉXITO ALEMÁN

Alemania ha desarrollado un eficaz sistema de transferencia tecnológica de los laboratorios de investigación a las plantas de producción

Stefan Theil

Felix Michl y Philipp Stahl se inclinan sobre un reluciente robot de tres brazos en un laboratorio de la Universidad Técnica de Múnich (TUM). El artilugio toma diminutas porciones de fibra de carbono, más finas que un cabello pero compuestas cada una por 24.000 filamentos, y las ensambla con rapidez en una estructura triangular. Los investigadores explican que la parte más delicada del proceso corresponde al desarrollo del programa informático que, a partir de un modelo computarizado en tres dimensiones (en este caso, de un sillín de bicicleta, pero bien podría ser el de una prótesis médica o una pieza de automóvil), generará las instrucciones para que el robot las coloque en una posición que garantice la máxima resistencia y durabilidad. El proyecto servirá a Michl para su tesis doctoral y a Stahl, para completar sus estudios de grado. Después, pasará a una segunda vida en las fábricas alemanas; entre ellas, las instalaciones punteras que BMW posee a unos 50 kilómetros de la ciudad medieval de Landshut, donde sus ingenieros se afanan en diseñar la próxima generación de automóviles.

Por el momento, la compañía se centra en la producción del BMW i3. Si su salida al mercado en 2013 cumple con las expectativas, será el primer automóvil totalmente eléctrico y construido con materiales ligeros orientado a un consumo de masas. La cabina ha sido diseñada con materiales compuestos de fibra de carbono, que investigadores y estudiantes como Michl y Stahl desarrollan en los laboratorios de Múnich. En este caso, la innovación clave consiste en una técnica que permite fabricar en apenas dos minutos ciertas partes complejas del automóvil, como el chasis lateral. Gracias a ella, estos materiales compuestos de última generación pueden fabricarse por vez primera a gran escala. Tres gigantescas prensas de 320 toneladas cada una inyectan resina en las partes ya moldeadas con fibra de carbono, lo que les confiere rigidez. La empresa asegura llevar la voz cantante en la manufactura de esta clase de materiales compuestos, por delante de competidoras como Toyota o General Motors. «Nuestra pericia a la hora de acoplar todos estos componentes no es algo que nuestros rivales puedan copiar con facilidad», asegura Andreas Reinhardt, director de proyectos de BMW.

Tal vez. El flujo constante de innovación que va desde los laboratorios de investigación públicos hasta fabricantes como BMW constituye una de las claves de la economía germana. Su industria, considerada durante largo tiempo mera herrería, ha capeado la crisis financiera sin apenas mellas en los beneficios o en el número de empleados. Y ello a pesar de que, en lo que respecta al sector industrial, los trabajadores alemanes se encuentran entre los mejores pagados del mundo y ganan unas diez veces más que sus homólogos chinos. Incluso cuando las exportaciones estadounidenses se desplomaban, las alemanas mantuvieron su cuota de mercado frente a China y otros países emergentes. El crecimiento del empleo en este sector constituye una de las razones por las que, según los datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la tasa de paro alemana en mayo de 2012 no pasaba del 5,6 por ciento. Las fábricas del país han mantenido su competitividad a escala mundial porque sus productos, como el BMW i3, rebosan ciencia e innovación.

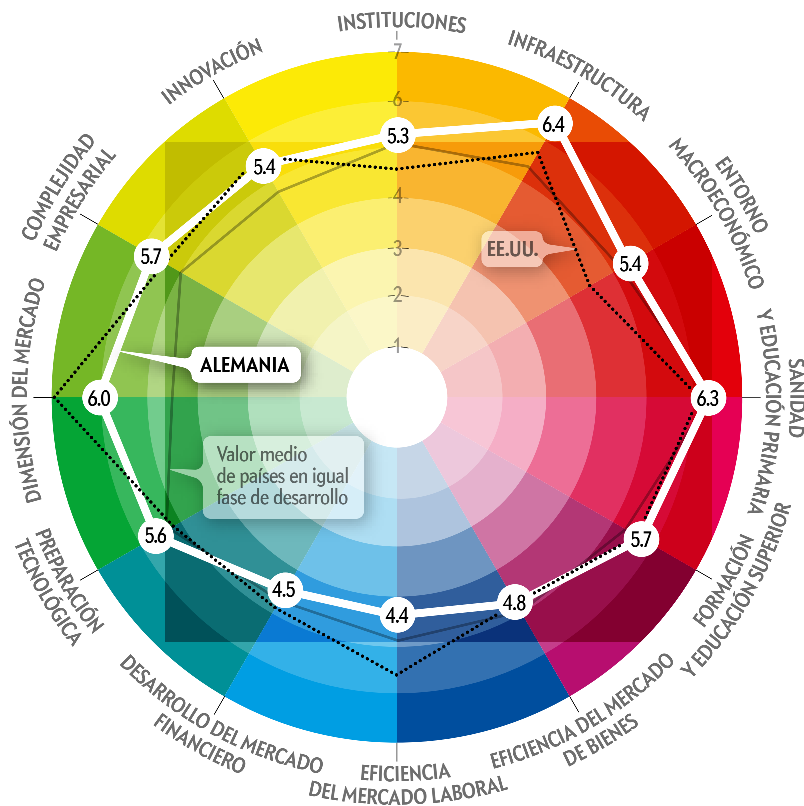
Una de las razones principales del éxito alemán reside en que la nación ha sabido canalizar sus logros en investigación para escalar en la carrera tecnológica, centrándose en la obtención de productos y procesos difíciles de copiar o de abaratar con salarios bajos. La industria textil proporciona un ejemplo al caso. Alemania, al igual que EE.UU. y numerosos países, perdió hace tiempo el grueso de sus fábricas de tejidos a causa de la competencia de países como China, India o Turquía. Sin embargo, sus empresas han conservado una posición dominante en el mercado de máquinas para tejer, trenzar o coser, un instrumental cada vez más complejo que ha disparado la inversión en países con

mano de obra barata. Mientras tanto, no pocas empresas textiles alemanas se reconvirtieron en compañías punteras, que ahora fabrican tejidos de última generación para el sector de la automoción o el aeroespacial. Hoy, la industria textil del país se halla en la vanguardia de la investigación sobre materiales compuestos, y coopera con universidades y centros tecnológicos en el desarrollo de maquinaria de precisión para trenzar e hilar fibras de carbono; no muy distinto de lo que se hace con la lana, pero a escala microscópica. Si el país hubiese dejado de apostar por el sector textil, hoy carecería de los medios necesarios para producir los materiales compuestos de última generación que desarrollan la TUM y otros laboratorios.

La clave para llevar los resultados de la investigación desde los laboratorios hasta el mercado estriba en la estrecha colaboración entre universidades e industria de base tecnológica. La mayor parte de los grandes fabricantes alemanes dedican jugosas partidas a investigación; a menudo, mediante la compra de los resultados que obtienen instituciones ajenas. A diferencia de numerosas empresas estadounidenses, que fundan una cátedra o efectúan donaciones genéricas a un departamento universitario, las compañías alemanas suelen pedir a las universidades que les ayuden a solucionar problemas muy concretos. En la TUM, el departamento de resinas y materiales compuestos está financiado por SGL Carbon, una productora de fibras de carbono que desea averiguar qué materiales se adaptarán mejor a la próxima generación de procesos de fabricación industriales. Una docena de los estudiantes de doctorado del departamento están en la nómina de BMW, que aprovechará los resultados de sus tesis en el diseño del i3. Otros fabricantes, como KUKA (robots) y Manz (prensas para materiales compuestos), se han implicado asimismo en la actividad investigadora de la universidad.

Ahora, multiplique esa intensa colaboración por docenas de universidades técnicas y facultades de ingeniería. En la Universidad Técnica de Renania-Westfalia en Aquisgrán (RWTH Aachen), más de veinte institutos investigan en técnicas punteras de producción, en cooperación con constructores de maquinaria, empresas de robótica e informáticas, con el propósito de idear procesos industriales tan eficientes que permitan a Alemania competir con países de mano de obra barata, como China. La RWTH Aachen está construyendo un parque industrial de 2000 millones de euros para las empresas participantes. El Instituto de Tecnología de Karlsruhe, especialista en ciencia de materiales y nanotecnología, colabora con las principales compañías químicas de Alemania, como BASF, en el desarrollo de nuevas sustancias para el almacenamiento de energías renovables. En la Universidad Técnica de Dresde, investigadores, fabricantes de microcircuitos y compañías de informática cooperan para conseguir circuitos integrados que consuman cien veces menos energía que los actuales.

El Gobierno del país desempeña una función clave en todo el proceso. Además de financiar excelentes laboratorios de ciencia básica, como los 80 institutos de la red Max Planck (que cubren disciplinas tan dispares como la física de partículas o la biología evolutiva), el país cuenta con la Sociedad Fraunhofer, la institución investigadora alemana de mayor éxito económico. Sus 60 centros reciben dinero del Gobierno lo mismo que de las empresas, motivo por el que se ajustan a una estricta lógica de mercado. Su presupuesto anual, que ronda los 2000 millones de euros, se beneficia de no pocos ingresos por patentes; por ejemplo, la del



Sobresaliente: Alemania supera a EE.UU. en varias medidas del Índice de Competitividad Global; entre ellas, en la calidad de sus instituciones e infraestructuras. El método de puntuación se detalla en el informe citado en la bibliografía.

FUENTE: *INFORME GLOBAL SOBRE COMPETITIVIDAD 2011-2012.* DIRIGIDO POR KLAUS SCHWAB. FORO ECONÓMICO MUNDIAL, 2011; ARNO GHELFI (*gráfico*)

EN SÍNTESIS

La robustez de la economía alemana se debe en parte al éxito de su sector fabril, el cual produce desde materiales básicos hasta maquinaria industrial.

La razón de que Alemania haya mantenido su competitividad frente a Asia radica en lo bien que su industria ha aprovechado las innovaciones técnicas.

La red Fraunhofer de institutos técnicos constituye un ejemplo de la estrecha colaboración que existe entre investigadores y fabricantes alemanes.

El país es líder en sectores clásicos, como el del automóvil, pero cuenta también con centros de excelencia en biotecnología y otras áreas emergentes.

formato MP3 de compresión de audio, inventado en 1989.

CONFIANZA SINGULAR

Cada instituto Fraunhofer, en asociación con las universidades cercanas, actúa de correa de transmisión para todo un conjunto de compañías ligadas al centro y entre sí. Ello se consigue gracias a colaboraciones de investigación concebidas para idear nuevos procesos y productos. Existen centros para todo sector industrial imaginable, como el de investigación de polímeros para compañías químicas, el de óptica de precisión para fabricantes de sensores y láseres, o el de nanoelectrónica para la industria de componentes informáticos.

Varios de ellos, como el Instituto Fraunhofer de Tecnología de la Producción, en Aquisgrán, investigan el desarrollo de técnicas de reducción de costes. Y en lo que respecta a la investigación sobre materiales compuestos, en la ciudad bávara de Augsburgo existe un grupo de proyectos Fraunhofer que evolucionó a partir de un laboratorio de cohetes de los tiempos de la Guerra Fría. En asociación con la TUM y más de cincuenta empresas (entre ellas, BMW, Audi y EADS, la propietaria del Airbus), el centro de Augsburgo desarrolla materiales compuestos de fibra que no derivan del petróleo, sino de la lignina, la parte leñosa de las plantas.

Otro factor que facilita la transferencia de tecnología procede de los incentivos con los que cuentan investigadores e ingenieros para saltar de la universidad a la industria, y viceversa. De media, un científico procedente de un centro Fraunhofer acaba incorporándose a la empresa en un plazo de entre cinco y diez años. Por su parte, muchos de los mejores ingenieros de la industria imparten clase en alguno de los institutos Fraunhofer o pertenecen a su equipo de dirección. Klaus Drechsler, profesor y director del Instituto de Materiales Compuestos de Carbono de la TUM, trabajó un tiempo en la compañía EADS desarrollando materiales compuestos para el Airbus. Hoy es el responsable de fundar un nuevo instituto en Augsburgo para la investigación de materiales compuestos. Este tipo de saltos profesionales, claves para la difusión de conocimiento y tecnología, no resulta tan habitual en otros países, en los que, muy a menudo, los investigadores contratados por una institución estatal permanecerán en ella durante toda su carrera.

Esa colaboración intensa y compleja entre ciencia e industria es típica de la innovación alemana. En gran parte, ha ido fraguándose durante décadas de relación entre empresas grandes y pequeñas. Hoy, gracias a esa tradición de colaboración, cada una de ellas ya sabe instintivamente qué información puede compartir con las demás y cuál ha de reservarse para sí. «Esa confianza entre compañías e instituciones, que compiten entre sí tanto como cooperan, es única. No se observa en muchos países», señala Beñat Bilbao, economista del Foro Económico Mundial y coautor del último *Informe global sobre competitividad*, en el que año tras año Alemania aparece en los primeros puestos. En su mayoría, estas agrupaciones han crecido y evolucionado durante decenios (y en ocasiones siglos, como los antiguos relojeros de la Selva Negra que, en la actualidad, se han convertido en los principales productores de instrumentos quirúrgicos de precisión del mundo), por lo que no resulta fácil copiarles.

Hoy, Alemania continúa creando nuevas redes para las industrias incipientes. Una de ellas es BioEconomy Cluster, en las inmediaciones de Leipzig, en la que más de 60 empresas participan en el desarrollo de métodos de producción de plásticos y otros productos sintéticos a partir de biomasa, con el objetivo de reemplazar al petróleo no solo en la obtención de energía, sino también en la de productos derivados. A la hora de crear nuevos centros, la Sociedad Fraunhofer no parte de cero, sino que comienza con compañías e instituciones especializadas. «Nuestro método se basa en tomar algo que ya funciona y regarlo para que crezca», explica Hans-Jörg Bullinger, presidente de la institución. Para la creación del nuevo instituto de materiales compuestos de carbono, la red buscó compañías y departamentos universitarios ya existentes y les proporcionó financiación, personal y servicios.

Pero la segunda lección, explica Bullinger, es el compromiso a largo plazo. Los nuevos institutos Fraunhofer tienen asegurada la financiación de manera indefinida y se gestionan por sí solos, sin otra exigencia durante los primeros cinco años que la de duplicar el capital inicial con aportaciones de compañías privadas. También la inversión en la industria mira a largo plazo. Muchas de las fábricas punteras más innovadoras son empresas familiares que no viven angustiadas por los resultados trimestrales. La típica compañía tecnológica alemana se asemeja a Trumpf, una empresa familiar casi invisible, pero que ha sido líder en láseres industriales durante más de una generación. En la actualidad, factura más de 2300 millones de euros al año. Incluso en los peores momentos de la crisis financiera, la Sociedad Fraunhofer contrató 3000 nuevos investigadores. «Muchos países han tratado de imitarnos», añade Bullinger, «pero sus esfuerzos fracasan porque piensan a corto plazo».

Ese podría ser el error fatal de la reciente propuesta del Gobierno de EE.UU. para financiar con 1000 millones de dólares una red nacional de innovación industrial concebida según el modelo de la alemana Fraunhofer. De proceder a su aprobación, en dicha red participarían entidades públicas y privadas que, en colaboración con la industria, establecerían hasta 15 centros de tecnología industrial por todo el país. Hasta aquí, perfecto. Sin embargo, la financiación solo se fija para los primeros cuatro años. En opinión de Bullinger, un plazo demasiado breve para que empresas e investigadores se impliquen en proyectos serios. «El resultado más probable será una carrera para obtener dinero del proyecto, en lugar de algo sostenible», opina Bullinger. Con todo, apunta que no dejaría de suponer un primer paso en la dirección correcta.

Desde luego, el sistema alemán adolece de sus propios puntos débiles. La mentalidad germana, tan dada a la precisión, tal vez resulte más idónea para perfeccionar técnicas ya existentes que para concebir innovaciones radicales. Y el país ha sufrido períodos de tecnofobia en los que políticos y movimientos de protesta han ahuyentado a industrias punteras muy prometedoras, como ocurrió en los años ochenta con las de biotecnología. Con todo, el empuje alemán a la innovación industrial invalida el cliché que asocia fábricas con técnicas obsoletas, al tiempo que proporciona un ejemplo de cómo competir con China. Los estudiantes que se afanan por reinventar la industria en los laboratorios universitarios de Múnich ofrecen un modelo del que todos deberíamos aprender.

PARA SABER MÁS

The global competitiveness report 2011-2012. Dirigido por Klaus Schwab. Foro Económico Mundial. Disponible en **reports.weforum.org/global-competitiveness-2011-2012**

EE.UU.
100

ALEMANIA
20,4

CHINA
19,8

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

Puntuación en una escala de 100, según los artículos publicados en revistas de máxima acreditación (Digital Science, 2011)

PATENTES CONCEDIDAS

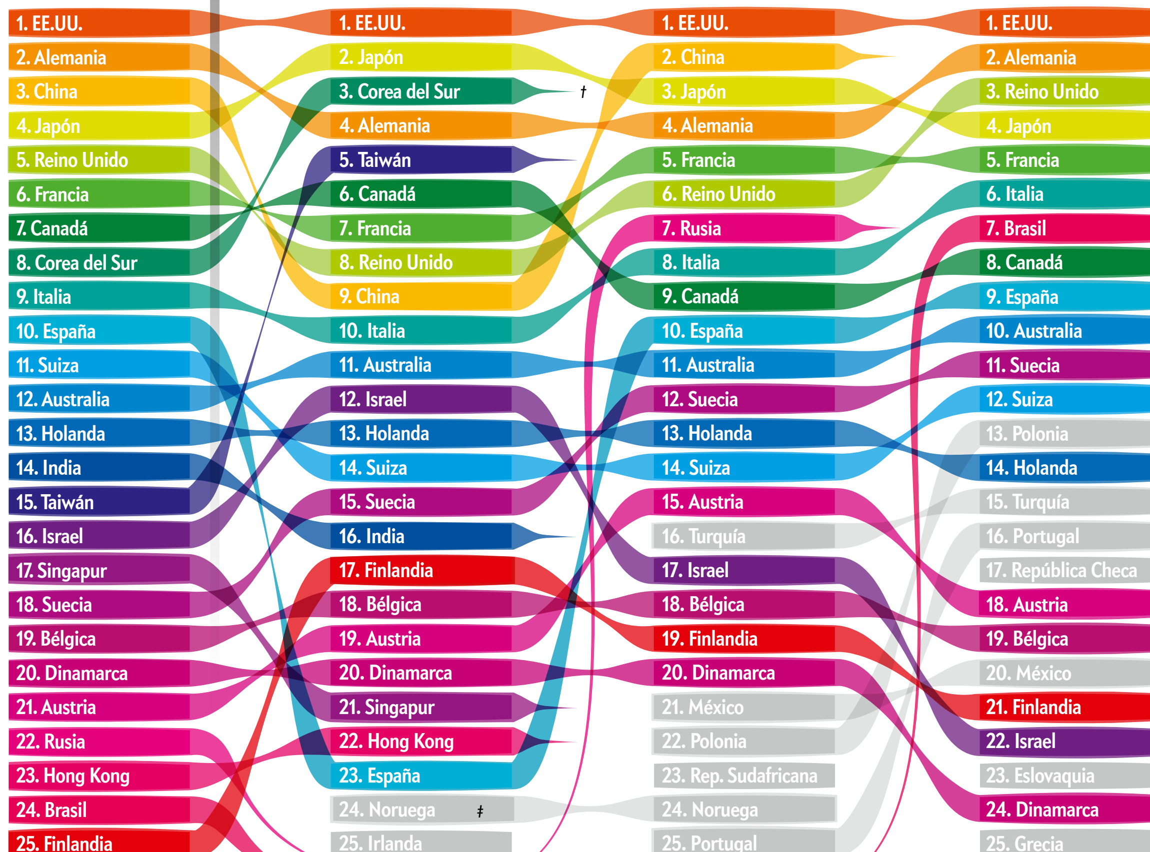
Número de patentes (Oficina de Patentes y Marcas Registradas de EE.UU., 2011)

INVERSIONES

Gasto nacional bruto dedicado a I+D (2009*)

EDUCACIÓN SUPERIOR

Número de nuevos doctores en ciencias e ingenierías (2009*)



** Los datos corresponden principalmente a países miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE). Valores de 2007 o 2008.*

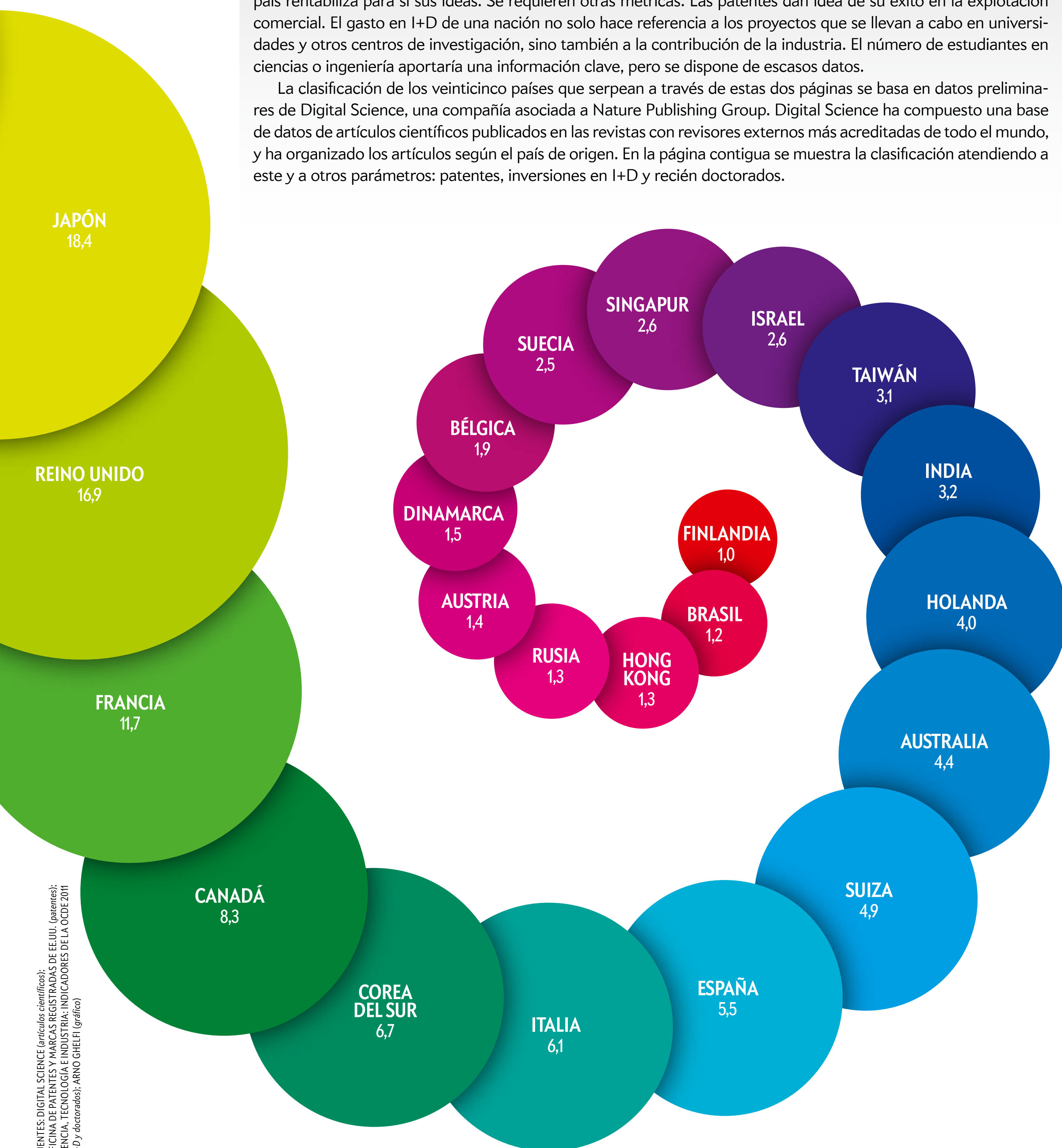
† El país no forma parte de la base de datos de la OCDE sobre I+D o doctorados.

‡ Los países en gris no se cuentan entre los 25 primeros que publican artículos científicos.

Países sobresalientes en ciencia

¿A qué se debe que un país aventaje científicamente a otro? No es fácil determinarlo. La publicación de artículos científicos constituye una buena medida en el caso de la investigación fundamental, pero no dice gran cosa de si ese país rentabiliza para sí sus ideas. Se requieren otras métricas. Las patentes dan idea de su éxito en la explotación comercial. El gasto en I+D de una nación no solo hace referencia a los proyectos que se llevan a cabo en universidades y otros centros de investigación, sino también a la contribución de la industria. El número de estudiantes en ciencias o ingeniería aportaría una información clave, pero se dispone de escasos datos.

La clasificación de los veinticinco países que serpean a través de estas dos páginas se basa en datos preliminares de Digital Science, una compañía asociada a Nature Publishing Group. Digital Science ha compuesto una base de datos de artículos científicos publicados en las revistas con revisores externos más acreditadas de todo el mundo, y ha organizado los artículos según el país de origen. En la página contigua se muestra la clasificación atendiendo a este y a otros parámetros: patentes, inversiones en I+D y recién doctorados.



FUENTES: DIGITAL SCIENCE (*artículos científicos*); OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. (*patentes*); CIENCIA, TECNOLOGÍA E INDUSTRIA: INDICADORES DE LA OCDE 2011 (*I+D y doctorados*); ARNO GHELFI (*gráfico*)



Philip G. Altbach es titular de la cátedra J. Donald Monan, S. J. en el Colegio Universitario de Boston y director del Centro para la Educación Superior Internacional.

Qi Wang es profesora en la Escuela Universitaria de Educación de la Universidad Jiao Tong, en Shanghái.

¿PUEDE CHINA CONTINUAR SU ASCENSO?

El reconocimiento mundial de su excelencia investigadora llega con nuevos retos para el gigante asiático

Philip G. Altbach y Qi Wang

Desde hace unos veinte años, China viene arrollando en Asia. Erige ciudades enteras de la nada, encabeza la lista mundial en construcción de centrales energéticas y su economía ha crecido cerca de un 10 por ciento anual. Semejante ascenso no se ha ceñido a la economía. En un período muy breve, China se ha convertido en una potencia científica global.

Las universidades del interior han experimentado una expansión impresionante. En 1978, China contaba con solo 860.000 alumnos en educación superior, el 1,6 por ciento de los adultos en edad formativa. En 2011, esa cifra se había inflado hasta más de 23 millones de estudiantes, en torno a un 27 por ciento. Por alumnos matriculados, el sistema de educación superior chino ocupa el primer puesto del mundo. El país posee ya más de un centenar de universidades de investigación en todos los campos, muchas de las cuales se dedican a la ciencia y la ingeniería. Tal escalada se refleja también en el número de alumnos de posgrado, que han pasado de 280.000 en el año 2000 a 1,6 millones en 2011.

Los dirigentes políticos chinos reconocen que la investigación científica y la educación superior resultan fundamentales para alcanzar el liderazgo mundial. Pero, a pesar de sus impresionantes logros, el país no tiene asegurado en modo alguno el camino hacia la primacía y la excelencia académica. Durante los últimos 40 años, la nación se ha esforzado por expandir a toda velocidad su sistema de educación e investigación y, al mismo tiempo, dotarse de un puñado de centros de excelencia. Hasta ahora, China ha venido haciendo equilibrios entre estos dos objetivos a fuerza de imponer penurias en la base para alimentar a una élite. Un desierto separa las instituciones más prestigiosas, como la Universidad de Pekín o la de Tsinghua, de aquellas que matriculan estudiantes en masa. Un pequeño porcentaje de titulados chinos recibe una educación de primera categoría, pero la gran mayoría carece de una formación decente y se ve excluida del mercado laboral.

A pesar de los enormes avances conseguidos hasta ahora, lograr mejoras notables no resultará sencillo. Los dirigentes del país comprobarán a lo largo del próximo decenio que, para lograr un sistema educativo de primera línea, no basta con bombear recursos hacia las universidades punteras. Serán necesarios cambios de calado en la cultura, la administración y el liderazgo académicos, así como en el funcionamiento de las universidades y en la percepción que el país tiene del mundo universitario e investigador.

MOTORES DE EXCELENCIA

Antes de la apertura del país en las postrimerías de los años setenta, el sistema chino de ciencia y tecnología se basaba en un modelo soviético. La investigación se hallaba a cargo de instituciones especializadas, y la enseñanza y la formación corrían por cuenta de universidades regidas por objetivos muy limitados. Aquel modelo fracasó porque separaba investigación y docencia, hacía imposible el trabajo interdisciplinar, contaba con recursos escasos y, además, sufría una pesada injerencia política e ideológica. Entre

EN SÍNTESIS

La economía china ha crecido tanto como sus esfuerzos en investigación. En muy poco tiempo se ha convertido en un líder mundial.

Algunas instituciones, como la Academia China de las Ciencias, se hallan a la par con algunos de los mejores centros investigadores del planeta.

Sin embargo, ese ascenso se ha concentrado en una élite. Existen enormes diferencias entre las instituciones más prestigiosas y el resto.

Las universidades chinas deberán resolver multitud de problemas; entre ellos, incoherencias en su normativa y cultura académicas.



Potencial: **El mercado chino, por su colosal tamaño, destaca en el Índice de Competitividad Global.**

FUENTE: *INFORME GLOBAL SOBRE COMPETITIVIDAD 2011-2012*. KLAUS SCHWAB (ED.). FORO ECONÓMICO MUNDIAL, 2011; ARNO GHELFI (*gráfico*)

1966 y 1976, la Revolución Cultural echó el cerrojo a la enseñanza superior y derribó mucho de lo construido con anterioridad. Llegados los años noventa, China amplió y reestructuró el sistema de enseñanza superior y lo puso al servicio de sus aspiraciones económicas.

Pero el Gobierno no tardó en percatarse de que, de acuerdo con los estándares de diversos estudios comparativos de todo el mundo, el país obtenía pobres resultados en innovación y creación de conocimiento. En 1995 se puso en marcha el Proyecto 211, con miras a desarrollar cien universidades y varias disciplinas científicas clave para principios del siglo XXI. Tres años después se lanzó el Proyecto 985, que ha acabado centrándose en 39 universidades de excelencia investigadora. El Gobierno nacional y las autoridades regionales han invertido el equivalente a unos 12.000 millones de euros adicionales en esas instituciones.

Todo lo anterior ha redundado en importantes recursos para un pequeño número de universidades, las cuales han visto potenciada su capacidad para la investigación y la innovación científica y técnica. Gracias al apoyo financiero de unos pocos proyectos nacionales, las universidades chinas han atraído a investigadores y profesores de máxima cualificación de todas partes del mundo; muchos de ellos, chinos en la diáspora.

Los presupuestos de las mejores universidades de investigación se acercan al de sus homólogas en otros países, y el número de publicaciones científicas se aproxima al de las universidades estadounidenses. En 2008, los centros del Proyecto 985 registraron 6073 patentes, nacionales e internacionales, frente a las 346 de 1999. Según la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de EE.UU., el número de licencias chinas inscritas en EE.UU. pasó de 41 en 1992 a 1874 en 2008.

DESAFÍO SISTÉMICO

En buena medida, la base del sistema educativo chino se encuentra atendida por un sector privado emergente (*minban*). Pero, en áreas como tecnología de la información o ciencias empresariales, su calidad resulta deficiente y, en gran parte, su educación se circunscribe a la formación profesional. Mientras que algunas de las mejores instituciones privadas forman personal competente de nivel medio, una gran cantidad de estudiantes carece de las destrezas que el país necesita para desarrollarse en una economía global del conocimiento. Algunas de ellas ofrecen estudios de grado, pero los estudiantes que no pueden permitirse hacer frente a una matrícula cara han de conformarse con títulos de dudoso valor. Otros pagan una pequeña fortuna por una formación profesional pobre y con escaso prestigio.

La deficiente calidad del sistema de educación chino se debe, sobre todo, al profesorado. Una tercera parte del personal docente de la universidad pública del país solo posee estudios de grado. La cifra, que llega al 60 por ciento en el nuevo sector privado, refleja la escasa preparación de buena parte de los docentes. Entre instituciones públicas y privadas, solo un 14 por ciento de los profesores posee el título de doctor, frente al 70 por ciento de las universidades chinas de mejor reputación. A excepción de un pequeño porcentaje de académicos muy productivos que trabajan en las mejores instituciones, el salario típico de un docente no basta para llevar una vida de clase media, lo que fomenta el pluriempleo. En un estudio reciente sobre 28 países entre los que se encontraban India, Rusia y Brasil, los académicos chinos se situaban entre los de menor poder adquisitivo.

Ese entorno no puede sostener una cultura académica de máxima calidad. Una universidad eficaz necesita un compromiso con la investigación básica, no vinculada a fines económicos, y ha de fomentar el trabajo interdisciplinar, dar cabida a un gobierno compartido y funcionar bajo normas claras. El profesorado debe gozar de libertad académica, acceso a todo tipo de fuentes de información y análisis, así como de flexibilidad para publicar. La universidad debe ser tan meritocrática como transparente en todas sus funciones, lo cual implica que los contactos personales, políticos o institucionales no deben influir en las decisiones académicas.

Tales requisitos se dan por supuestos en el mundo desarrollado, pero en las universidades chinas siguen planteando un desafío. Incluso los centros más prestigiosos temen que sus planes de estudio y sus métodos de enseñanza estén desfasados y resulten inadecuados para el mundo moderno. Aún hoy se continúa fomentando un aprendizaje memorístico, a expensas de la creatividad y el pensamiento crítico. El Gobierno del país, que ejerce una administración centralizada sobre los recursos y las becas universitarias, puede afectar al desarrollo de los estudiantes y entorpecer una competición en condiciones justas por la excelencia investigadora. Es conocida la abundancia de plagios y otras corruptelas en el ambiente académico chino, así como un exceso en la propensión a recurrir al *guanxi* (contactos personales). La cultura docente suele ser jerárquica y burocrática.

Muchas de las principales universidades están considerando modificar sus planes de estudio y fomentar métodos pedagógicos que incentiven una participación más activa de los estudiantes. También están contratando jóvenes doctores procedentes de las universidades extranjeras de mayor prestigio, así como introduciendo métodos de evaluación interna más rigurosos. A pesar de todo, cambiar la cultura académica del 80 por ciento del sistema educativo resultará muy difícil. Las instituciones del país siguen siendo muy tradicionales y burocráticas. Las malas prácticas suelen acabar formando parte integral del sistema y se resisten a desaparecer. Hasta hoy, una combinación de recursos y voluntad de reforma ha prestado buenos servicios a China, al menos en la cima del sistema universitario. Puede que el cambio cultural acabe produciéndose, pero tardará en llegar.

PARA SABER MÁS

Leadership for world-class universities: Challenges for developing countries. Dirigido por Philip G. Altbach. Routledge, 2010.

The road to academic excellence: The making of world-class research universities. Philip G.Altbach y Jamil Salmi (eds.). Banco Mundial, 2011.

Paula Stephan es profesora de economía en la Universidad estatal de Georgia e investigadora en la Oficina Nacional de Investigación Económica de EE.UU.



RECOMPENSAR LA PRODUCTIVIDAD

Las diferencias salariales entre investigadores desempeñan un papel clave en el liderazgo científico de EE.UU.

Paula Stephan

Estados Unidos lleva largo tiempo disfrutando de una posición preeminente en el mundo científico. El país realiza más investigaciones que ningún otro, se sitúa a la cabeza de artículos publicados y citas recibidas, y trabajan en él más premios Nobel que en cualquier otra nación. Representa también el destino predilecto de científicos e ingenieros de todo el mundo; de hecho, gran parte de sus laureados son oriundos de otras regiones del globo.

¿Cómo explicar la elevada productividad científica de EE.UU.? ¿Por qué atrae de esa manera a investigadores nacidos y educados fuera de sus fronteras? Sin duda, buena parte del fenómeno obedece a la gran cantidad de recursos que el país invierte en ciencia. Estados Unidos goza de un reputado historial de apoyo a la investigación en la universidad, a la que dedica más del 0,3 por ciento de su PIB anual. Los académicos perciben allí salarios más cuantiosos que en Europa, con la única posible excepción de Irlanda (antes de la crisis de 2008). En Francia o Alemania, un catedrático gana unos 4500 euros mensuales. La cifra representa el 55 por ciento de lo que reciben sus homólogos en EE.UU. Y, aunque la demanda laboral de doctores ha sufrido una contracción durante los últimos años, no existen motivos para pensar que los académicos de EE.UU. hayan perdido el primer puesto en lo que respecta al salario que perciben.

Pero lo elevado de la paga solo justifica de manera parcial el liderazgo del país. Otro factor lo supone la disparidad entre las nóminas de sus investigadores, una circunstancia que ejerce un enorme peso en la capacidad de una nación para atraer a los mejores y más brillantes. En comparación con casi cualquier otro lugar, las universidades estadounidenses disponen de mayor autonomía para recompensar la productividad y ofrecer salarios elevados a las grandes estrellas del firmamento científico.

Las desigualdades salariales no son habituales en otros países. A menudo, el sueldo queda establecido en función del rango académico y la antigüedad en el puesto, lo cual significa que todos aquellos que posean idéntica categoría y que lleven un número equiparable de años en el cargo cobrarán exactamente lo mismo. La única recompensa para los más productivos tal vez consista en un reconocimiento de méritos para ascender con mayor rapidez o, en ciertos países, la posibilidad de recibir mayor financiación para sus investigaciones. En ocasiones, de hecho, un ascenso puede traducirse en un incremento salarial casi inapreciable. En Noruega, un catedrático recibe, en el mejor de los casos, en torno a un 30 por ciento más que alguien que acabe de incorporarse a la carrera docente. En EE.UU. la diferencia porcentual promedio asciende a entre un 60 y un 80 por ciento, lo cual no impide que un investigador excepcionalmente productivo pueda llegar a ganar hasta cuatro y cinco veces más que un nuevo contratado. En términos de salario relativo, el modelo japonés se acerca más al estadounidense que al europeo: en el país asiático, un catedrático gana casi el doble que un profesor recién incorporado.

En Europa, una vez que un científico ha sido contratado por una universidad, no ocurre con frecuencia que cambie de trabajo o que sea reclutado por otro centro investigador: apenas existen incentivos para ello. En la mayor parte de Europa, los docentes son funcionarios del Estado y reciben un mismo salario con independencia del lugar en el que trabajen. Dentro de un país, el sueldo no desempeña papel alguno en la contratación de docentes por parte de una institución u otra.

En EE.UU., en cambio, el salario que percibe un profesor universitario varía de manera sustancial en tres dimensiones clave: la remuneración inicial, el sueldo

EN SÍNTESIS

Estados Unidos ocupa el primer puesto en ciencia según casi todos los criterios de calificación. Gran parte de su éxito se debe a los recursos que destina a sus universidades.

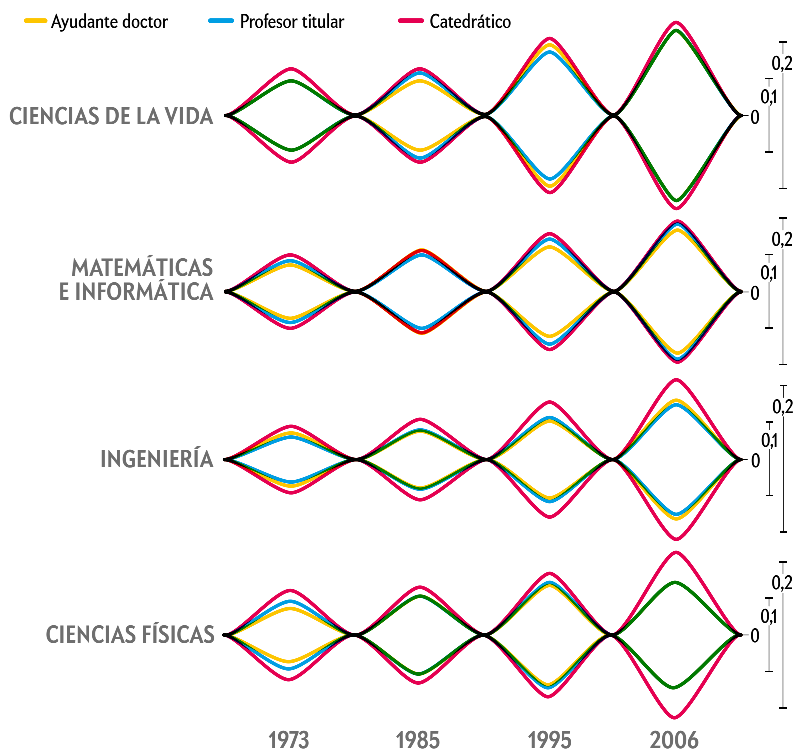
Sin embargo, otro factor clave reside en la capacidad de las instituciones estadounidenses para recompensar con salarios elevados a los científicos más productivos.

En Europa, en cambio, la mayoría de los investigadores son funcionarios del Estado. Su salario depende más del rango y de la antigüedad que de su productividad.

dentro de un mismo nivel de docencia y las diferencias entre un rango académico y otro. En 2008, el salario inicial medio de un profesor de informática rozaba los 85.000 dólares (unos 67.000 euros); sin embargo, el sueldo inicial más alto que se pagó ese año llegaba a los 125.000 dólares (casi 100.000 euros). Entre profesores titulares, las diferencias se mostraban aún más abultadas: con unos ingresos medios de 100.000 dólares, la paga más elevada ascendió a casi el doble (195.000 dólares). Y en el caso de los catedráticos de universidad, la media fue de 133.000 dólares y el máximo, de 301.000 dólares.

Una de las consideraciones principales para determinar las diferencias salariales es la productividad. A la hora de decidir ascensos o aumentos de sueldo, casi todas las universidades estadounidenses valoran la productividad investigadora conforme a la calidad de los artículos publicados. Con todo, los mejores científicos suelen acabar yéndose a las universidades que pagan sueldos más elevados, que, por lo general, suelen ser privadas. En 2010, solo una institución pública (la Universidad de California en Los Ángeles) se encontraba entre la lista de aquellas que costeaban los 20 mejores salarios (y, aun así, esa nómina ascendía a 43.000 dólares menos que la correspondiente a Harvard). Los centros privados no solo pagan mejor, sino que pueden permitirse mejores instalaciones y estudiantes más selectos.

Una medida de las diferencias salariales entre el personal de un mismo rango académico la proporciona el índice de Gini. En un país en el que todos los investigadores con idéntica categoría y años de antigüedad cobrasen lo mismo, el coeficiente de Gini (para dicho nivel) sería 0. El extremo opuesto —si, por ejemplo, solo un investigador cobrase y los demás no percibiesen nada— correspondería a un índice de Gini igual a 1. Desde luego, ninguna gradación de salarios resulta tan abrupta, pero en EE.UU. el coeficiente de Gini para los investigadores no se aproxima nunca a 0. El del equivalente al cargo de ayudante doctor en ingeniería asciende a 0,164; el de los catedráticos, a 0,22. Ello refleja diferencias notables dentro de una misma categoría, así como una desigualdad creciente a medida que se asciende en el escalafón. A la vista de estos resultados, podemos afirmar, sin demasiado temor a equivocarnos, que las políticas de salarios elevados y de recompensa de la productividad desempeñan un papel importante en la posición global de ciencia estadounidense.



Élites cada vez más poderosas: Las diferencias salariales entre los docentes de ciencia e ingeniería de EE.UU. han aumentado de manera notable entre 1973 y 2006, tal y como muestra este gráfico de índices de Gini (un medidor estadístico de la desigualdad; datos de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU.). En ciencias de la vida y en computación se observan grandes variaciones en todos los niveles; en ingeniería y física, las diferencias se muestran especialmente acusadas entre los docentes de mayor rango académico.

Pero la remuneración económica por sí sola no basta. Si así fuera, la Universidad Rey Abdullah de Ciencia y Tecnología, en Arabia Saudí, encabezaría cualquier clasificación mundial de universidades. Según un estudio de 2008 que comparaba los ingresos de los académicos en 15 países representativos (entre ellos, Reino Unido, EE.UU., Japón y China), los mayores salarios en función del nivel de vida eran los percibidos por los investigadores de la Universidad Rey Abdullah. A pesar de ello, el centro se sitúa muy lejos de los puestos líderes en investigación.

Estados Unidos goza desde hace tiempo de una excelente reputación en lo que a sus instituciones académicas y su producción científica se refiere. La capacidad para contratar y recompensar a docentes sumamente productivos ha desempeñado en ello un papel fundamental. No obstante, la desigualdad salarial en EE.UU. se ha disparado durante los últimos años. Mientras que numerosas instituciones públicas han recibido menos fondos de sus respectivos estados, las dotaciones de instituciones privadas como Harvard y Yale han aumentado de manera considerable, lo cual les ha permitido beneficiarse de una política de contrataciones muy dinámica. La cuestión de si un mayor aumento de las desigualdades salariales será positivo para el futuro de las universidades estadounidenses constituye materia de debate.

A los investigadores no solo les importa el dinero. Valoran también la independencia y los retos que implica hacer ciencia. Sin embargo, los recursos resultan esenciales para que aquellos con más talento puedan dedicarse sin ataduras a sus pasiones. Cuando se trata de producir la mejor ciencia posible, compensa fomentar una sociedad de élites.

PARA SABER MÁS

International comparison of academic salaries: An exploratory study. Laura E. Rumbley et al. Boston College, octubre de 2008.

How economics shapes science. Paula Stephan. Harvard University Press, 2012.

Una comparación entre los salarios que perciben los académicos en distintos países puede verse en la página del Instituto Universitario Europeo: **eui.eu**

MÁS QUE LA SUMA DE LAS PARTES

La colaboración internacional resulta muy productiva en ciencia, según Paul Nurse, presidente de la Real Sociedad Británica

Fred Guterl

PAUL NURSE SABE POR EXPERIENCIA LO QUE CUESTA CONVERTIRSE en un científico productivo. Criado por sus abuelos —un arreglalotodo y una cocinera— en una Inglaterra fuertemente clasista, Nurse perseveró en sus estudios hasta obtener datos precursores sobre el ADN y la división celular, que le valieron un premio Nobel en 2001. En 2003 fue nombrado rector de la Universidad Rockefeller, en la ciudad de Nueva York, y en 2010, presidente de la Real Sociedad Británica, lo que le convirtió en un gran conocedor de las diferencias culturales entre científicos europeos y estadounidenses. Hoy vive entre Londres y Nueva York, donde todavía realiza investigaciones de laboratorio. Nurse conversa con nuestra revista sobre la cambiante faz de la ciencia mundial.

¿Qué tendencias aprecia usted?
Se están produciendo en la ciencia alianzas a gran escala. Más del 35 por ciento de los artículos publicados en las revistas más prestigiosas corresponden hoy a colaboraciones internacionales, en comparación con el 25 por ciento de hace 15 años. La colaboración va en aumento, y probablemente lo siga haciendo hasta un nivel muy sorprendente.

¿Qué supone para la ciencia esa colaboración?
Existen ciertas diferencias culturales en la orientación que se da a la ciencia. En EE.UU. se pone especial acento en el individuo. Europa, en cambio, se inclina más hacia la colaboración. En el Lejano Oriente parece interesar más la generación de grandes cantidades de datos, que constituyen el sólido fundamento sobre el que se construye la ciencia. Esa mixtura de culturas resulta muy enriquecedora [*véase* «Condiciones de contorno», por Alice P. Gast; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2012].

¿Qué opina del ascenso de Asia?
Estamos presenciando el auge científico de países y culturas que no pertenecen a lo que podríamos llamar la tradición occidental. Los dirigentes chinos han reconocido el papel crucial de la ciencia para el desarrollo de su país y para mejorar la calidad de vida de sus gentes. En consecuencia, están convirtiendo la ciencia en una prioridad nacional y están procurando hacer de ella una profesión atractiva para los mejor preparados.

La progresión de la ciencia china en los últimos decenios ha sido fantástica. Gracias a planes increíblemente eficientes y eficaces, estamos viendo generar grandes volúmenes de datos de secuenciación de ADN, analizados por medios informáticos. Lo cual constituye una tarea ardua. Entre quienes hoy trabajan en biomedicina, muchos buscan ayuda en China, porque allí se realiza esa actividad de modo excelente. Aunque sin duda ellos mismos opinen que han de prestar atención a la ciencia más innovadora.

India ha producido magníficos científicos. Todavía no ha invertido tanto como China, pero cuenta con una larga tradición en determinadas ciencias, sobre todo en matemáticas y en física, y su importancia en los años venideros continuará creciendo.

¿Pesa la cultura nacional en la clase de ciencia que produce un país?
Determinadas ciencias parecen prosperar en ciertas culturas. Hungría, por ejemplo, es muy competente en ciencias teóricas y en matemáticas, no se sabe exactamente por qué. El Reino Unido obtiene buenos resultados en ciencias a pesar de que no invierte tanto en investigación como otros



JOHN SPINKS

países: un 1,8 por ciento del PIB frente al 2,9 por ciento de EE.UU. Si bien su población representa solo un 1 por ciento de la mundial, produce el 14 por ciento de los artículos de mayor impacto, lo cual resulta extraordinario. Desconozco el motivo por el que la ciencia inglesa es tan productiva. Tal vez guarde relación con la cultura general, además de cierta orientación hacia una mezcla de empirismo y teoría, hacia lo práctico, la liberalidad y la apertura a ideas nuevas.

¿Qué supone para la ciencia esta creciente colaboración internacional?

Lograr que muchos países trabajen juntos posee un gran valor simbólico. En el caso de instalaciones de gran tamaño y elevados costes, como los grandes colisionadores de partículas (entre ellos, el Gran Colisionador de Hadrones), o de los grandes telescopios, cuanto más internacionales sean los grupos, tanto mejor. Si trabajando juntos es posible poner en el espacio un telescopio mayor, hagámoslo.

También conlleva ventajas en ciencias como la biología. A la hora de secuenciar el genoma humano o estudiar otros aspectos similares, las piezas de los equipos resultan menos onerosas y los costes se pueden repartir entre más países. La clave radica en lograr que se entiendan entre sí para evitar una repetición de las tareas. La secuenciación de grandes cantidades de datos no es demasiado apasionante; uno prefiere evitar ese trabajo si otros ya lo están haciendo. Cuando existen diferentes centros que comparten datos, el todo puede ser mayor que la suma de las partes.

En genómica, ¿a dónde le parece que lleva esta colaboración?

La recopilación de datos cobrará gran importancia en los años venideros. Un proyecto internacional, transversal, al que pueden contribuir diferentes centros, es el estudio de la variabilidad humana mediante la secuenciación de un millar de personas de diferentes raíces étnicas. También está despegando la aplicación de la genómica para catalogar las formas de vida del planeta. Consiste en emplear la secuenciación genómica para definir todas las especies animales, vegetales, microbianas y víricas que existen en el mundo. La técnica proporciona la precisión que necesitamos, y ha de combinarse con la taxonomía y la ecología. La creación de una enciclopedia de la vida representa una auténtica colaboración multinacional.

¿Qué otros problemas se prestan bien a la colaboración?

La producción de energía de forma más sostenible y menos contaminante constituye una tarea que no entiende de fronteras. No importa el lugar donde se efectúen las investigaciones ni donde se adopten las soluciones técnicas. Además, podría suponer el transporte de energía, bajo diversas formas, a través de las fronteras nacionales.

¿En qué medida pesan las políticas de inmigración?

Esta es una cuestión que me despierta inquietud. La ciencia medra por sinergias entre individuos y culturas. Suiza, abierta a inmigrantes cualificados, posee una potencia científica muy por encima de su peso demográfico. Las puertas abiertas incentivan la ciencia. Los EE.UU. han sido receptivos a la inmigración en ciertos momentos, pero no tanto en otros. En el siglo xx, el rigor aportado por los investigadores emigrados desde Europa central, junto con la capacidad de hacer estadounidense, situaron al país en una posición puntera en ciencia. Gran Bretaña sobresalió en su época de imperialismo, cuando podía recurrir sin cesar a diferentes culturas.

Si unos países perciben que otros no son receptivos pueden surgir problemas, pues no se presentarán solicitudes para investigar en ellos. Por otra parte, para que países como China e India suban a lo alto del podio, necesitan atraer a personal experto del extranjero y desarrollar vigorosas interacciones con gentes de ultramar.

¿Qué papel va a ejercer la colaboración científica en la escena mundial?

En ciencia se habla un mismo idioma. Los investigadores de diferentes países nos entendemos porque abordamos los problemas de forma semejante, desde un mismo enfoque. La ciencia constituye un catalizador que puede romper las barreras entre las naciones.

Gonzalo León, vicerrector de investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, es experto en política científica y transferencia tecnológica.



INNOVACIÓN EN LA UE

Europa necesita una política de innovación eficaz y un verdadero espacio científico común que trascienda sus propias fronteras

Gonzalo León

El proceso de globalización en el que nos encontramos inmersos desde hace décadas ha experimentado durante los últimos diez años una aceleración notable. En lo que se refiere a la generación de conocimiento científico y tecnológico, EE.UU., Japón y la UE han dejado de ser un referente casi único para pasar a formar parte de un panorama mundial mucho más complejo, en el que nuevos actores como China, Brasil, India o Rusia, entre otros, han cobrado un protagonismo impensable hace apenas unos años. Para entender la senda que la UE debe tomar en este contexto, debemos primero repasar la política científica que se ha venido desarrollando hasta ahora.

El reconocimiento de que Europa no podrá competir en un mundo cada vez más globalizado si no es gracias al valor añadido de sus bienes, productos y servicios —es decir, explotando el conocimiento generado— ha supuesto una constante desde la puesta en marcha de la Estrategia de Lisboa. Esta nació en el año 2000 con el ambicioso objetivo de conseguir que, para 2010, la UE fuese «la economía basada en el conocimiento más próspera y dinámica del mundo, capaz de generar un crecimiento económico sostenido, con más y mejores empleos y una mayor cohesión social». Con el paso de los años, sin embargo, hemos aprendido que esa meta no resultará sencilla de alcanzar. En particular, no lo lograremos con un pequeño programa comunitario y con 27 planes nacionales que se mantienen prácticamente aislados entre sí.

Desde el punto de vista de la investigación, el elemento central de la Estrategia de Lisboa consistió en articular el Espacio Europeo de Investigación (EEI), un ámbito común que favoreciese la libre circulación de ideas y expertos entre los Estados de la Unión. Hoy por hoy, sin embargo, el EEI dista mucho de haberse materializado. Ello se debe en parte a una escasez de financiación: la meta inicial de dedicar el 3 por ciento del PIB europeo a los planes de investigación y desarrollo (I+D) para 2010 se encuentra aún muy lejos cuando, en la actualidad, ese gasto no excede el 2 por ciento del PIB. Asimismo, no podemos ignorar que todos los países europeos continúan manteniendo una visión nacional, la cual se ha agudizado en época de crisis. Si bien los sucesivos Programas Marco de la UE han dedicado fondos comunitarios a promover de manera explícita la cooperación entre los Estados miembros, hoy dicha inversión no supera el 8 por ciento de los recursos que el conjunto de la UE consagra a investigación y desarrollo.

Por otro lado, acabamos de asistir a un complejo proceso de reestructuración de la enseñanza universitaria. Este, también conocido como proceso de Bolonia, debía adaptar los planes de estudio nacionales al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) con el objetivo de facilitar el reconocimiento de títulos y la movilidad. Sin embargo, aunque esa reestructuración sí se ha desarrollado desde una perspectiva formal (con la creación de nuevos currículos basados en un sistema de créditos europeos que pone el énfasis en la actividad del alumno), aún no se ha completado desde el punto de vista de un cambio radical en los modelos de enseñanza. Sin duda, la relación entre el espacio investigador y el de educación superior constituye un eje fundamental para la competitividad de la Unión. Sería muy deseable que, en un futuro próximo, programas de tanto calado como Erasmus, que faciliten la movilidad de estudiantes o la puesta en marcha de las escuelas de doctorado europeas, acaben asentándose como elementos clave del EEES.

POR UNA POLÍTICA DE INNOVACIÓN

Sin embargo, a pesar de la importancia de los fines que persigue el EEI, la experiencia nos ha enseñado que no deberíamos actuar únicamente desde el ámbito de la investigación ni limitarnos al seno de la UE. De poco sirve asignar recursos públicos a I+D si estos no van acompañados de un esfuerzo innovador que revierta en nuevos productos y servicios para introducirlos en un mercado global y mejorar así la calidad de vida de los ciudadanos.

Por desgracia, las políticas de educación, investigación e innovación no se han abordado hasta ahora desde una perspectiva sistémica. En Europa siempre ha sido difícil actuar sobre los tres ámbitos de manera conjunta. Los Gobiernos nacionales

EN SÍNTESIS

Si desea competir en la economía global del conocimiento, la UE debe abordar de manera sistémica la cooperación entre universidad y empresa.

Hasta ahora, los Gobiernos han fragmentado sus políticas en educación, investigación e innovación con acciones dependientes de distintos organismos.

A partir de 2014 la UE estudia implementar un programa que integre todas las actuaciones de investigación e innovación bajo una estrategia común.

tienden a fragmentar sus acciones, ya sea según su naturaleza (educación, investigación o innovación) o sus destinatarios (universidades o empresas), con programas y presupuestos ligados a ministerios distintos. Si bien existe un amplio reconocimiento de la necesidad de actuar de forma integrada, en la práctica las acciones se limitan a crear programas de apoyo dependientes de diferentes organismos. Incluso cuando los Gobiernos han creado departamentos o agencias de financiación con amplias competencias, se ha mantenido una visión diferenciada.

En el caso europeo, a ese problema se suma que cada uno de los grandes actores (universidades, Gobiernos y empresas) persigue sus propios fines, establece sus prioridades y lleva a cabo sus actuaciones sin apenas contar con los demás. A pesar de la proliferación de «redes» de todo tipo, la cooperación estable entre universidades escasea. Y aunque la colaboración entre universidad y empresa ha mejorado de manera notable durante los últimos años, todavía debemos pasar de una cooperación basada en proyectos aislados (promovida por algunas convocatorias públicas, en las que se exige una colaboración para obtener financiación para un proyecto determinado) a una relación continuada en el tiempo.

El esfuerzo que la UE ha invertido en I+D no ha venido acompañado de una política de innovación que permitiera explotar sus resultados de cara a potenciar el liderazgo de la Unión en los mercados tecnológicos internacionales. Con este fin nació en 2008 el Instituto Europeo de Innovación y Tecnología. Entre otros objetivos, esta nueva institución aspira a crear comunidades de innovación y conocimiento (KIC, por sus siglas en inglés) que redunden en la generación de nuevas empresas de base tecnológica, así como a fomentar una formación emprendedora que sirva de puente entre la educación superior y la innovación. Para ello contará con la participación de universidades y empresas, así como con el apoyo económico de la Comisión Europea.

Por último, no debemos olvidar que un modelo exitoso no puede reducirse al ámbito geográfico de la Unión. En la actual economía global del conocimiento, la interacción entre investigación e innovación está trascendiendo las fronteras nacionales y ya ha provocado la aparición de unidades de investigación no solo en un contexto europeo, sino también con empresas y universidades ajenas a la UE. Vivimos un proceso de internacionalización imparable en el que empieza a ser común que universidades europeas instalen centros fuera de la UE, en la estela que las grandes empresas globales iniciaron ya hace años.

HORIZONTE 2020

La necesidad de relanzar los objetivos de la Estrategia de Lisboa ha llevado a la UE a rediseñar su política científica. Una de las nuevas iniciativas es la Unión Innovadora, la cual pretende completar la construcción del EEI y crear un marco más favorable a la innovación. En ese contexto, se presentó en noviembre de 2011 la propuesta Horizonte 2020, el instrumento financiero que deberá ponerla en marcha entre 2014 y 2020, actualmente en proceso de negociación.

El programa se propone integrar investigación e innovación, desde la idea hasta el mercado, con especial atención a la creación de oportunidades de negocio a partir de la respuesta europea a grandes preocupaciones comunes, retos sociales y tecnologías clave. La propuesta contempla prestar más atención a la demostración de tecnologías, así como crear proyectos piloto en los que participen los usuarios. Los «laboratorios vivos» (*living labs*, espacios de experimentación controlada en los que los diseñadores interaccionan con los usuarios) adquirirán cada vez mayor importancia.

La financiación propuesta para Horizonte 2020 asciende a unos 80.000 millones de euros, lo cual supondría el 8,5 por ciento del presupuesto europeo y un incremento del 43 por ciento con respecto al último Programa Marco (7PM, con un período de actuación comprendido entre 2007 y 2013). De ellos, 25.000 millones se dedicarán a ciencia básica y 18.000 millones a hacer de Europa un lugar más atractivo para la inversión en investigación e innovación mediante el fomento de actividades en las que sean las empresas quienes determinen la agenda prioritaria. El resto, unos 32.000 millones, servirá para atender retos sociales de gran calado como el cambio climático, el problema energético, la seguridad alimentaria o el envejecimiento de la población. Tales objetivos se integrarán con las actuaciones de I+D de cada uno de los Estados a través de iniciativas de programación conjunta, en las que algunos Estados miembros invertirán recursos comunes en un área definida conjuntamente mediante una agenda estratégica.

Además, el programa Horizonte 2020 se abrirá a la asociación con países ajenos a la UE que cumplan ciertos criterios (capacidad, éxitos previos, lazos económicos y geográficos con la Unión, etcétera). Las acciones se plantearán desde un enfoque estratégico hacia la cooperación internacional, con el objetivo de apoyar la competitividad europea en el contexto mundial. Ello otorgará al proceso de innovación una dimensión imprescindible a la hora de acceder a un mercado global. A tal fin, será posible incluir entidades no europeas (reciban o no financiación comunitaria) en todas las actuaciones del programa.

CONSECUENCIAS PARA ESPAÑA

La participación española en el programa Horizonte 2020 no dependerá solo de la estructura de dicha propuesta, sino también de la evolución de nuestro propio sistema de I+D. El país se encuentra en estos momentos en un proceso de definición de su estrategia de ciencia y tecnología. En paralelo, debe también decidir cuál será su estrategia en innovación. Nos hallamos por tanto ante una oportunidad única para alinear nuestros planes conforme el marco definido por el programa Horizonte 2020.

Sin embargo, si no se priorizan las actividades en I+D e innovación, el riesgo para España reside en que la aplicación de los principios que subyacen a la construcción del EEI y al programa Horizonte 2020 conduzca a una Europa de varias velocidades: un núcleo de países fuertes con presupuesto y medios para liderar áreas estratégicas, un segundo grupo en el que el esfuerzo se centrará en aprovechar la infraestructura disponible, y un tercero que, con problemas estructurales y escasa inversión en I+D, solo podrá proporcionar recursos humanos... a los demás. Confiemos en que la crisis actual no ciegue a nuestros políticos y en que sabremos ver más allá de las dificultades presentes para que este no sea nuestro caso [*véase* «Más difícil todavía», por Luis Sanz Menéndez; Investigación y Ciencia, noviembre de 2012].

PARA SABER MÁS

Séptimo Programa Marco de la UE: **cordis.europa.eu/fp7/home_es.html**
Horizonte 2020: **ec.europa.eu/research/horizon2020**
Instituto Europeo de Innovación y Tecnología: **eit.europa.eu**

por Fabio Cupul, Julián Bueno y Robert Mesibov

Las numerosas patas del ciempiés

Además de utilizarlas para desplazarse, algunas especies las emplean para proteger a sus crías

Los ciempiés son animales típicamente solitarios y de hábitos nocturnos. Se han descrito unas 3300 especies y su aparición sobre la faz de la Tierra se remonta a hace 420 millones de años. Son depredadores consumados de otros artrópodos, aunque los grandes ejemplares, de hasta 30 centímetros, depredan anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Forman una parte importante de la fauna del suelo de desiertos, estepas, cuevas, selvas y bosques de las regiones tropicales, subtropicales y templadas del planeta. Además, son un componente principal de la dieta de otros grupos zoológicos, como aves y mamíferos. El factor que más influye en su distribución es la humedad, por lo que se los observa con mayor frecuencia durante la temporada de lluvias, de noche y en lugares húmedos.

Su cuerpo, comprimido dorsoventralmente y de 1 a 10 centímetros de longitud, está formado por un tronco multisegmentado. Cada segmento presenta un par de patas que se extienden lateralmente. En la cabeza se observan un par de antenas y un par de forcípulas (colmillos) que, evolutivamente, son el resultado de la modificación de un primer par de patas. Las forcípulas se utilizan para inocular veneno neurotóxico e inmovilizar así a las presas.

Los sexos se hallan separados y puede existir o no dimorfismo sexual, según la especie. La fecundación es interna por reproducción indirecta, a través de la transferencia del espermatóforo (cápsula que contiene el esperma) del macho a la hembra. Todas las especies son ovíparas. En algunos casos, después de la ovoposición, las hembras se enrollan sobre la masa de huevos y los resguardan entre sus patas hasta que nacen las crías. También se han observado juveniles protegidos entre las patas de hembras adultas, por lo que se considera que les proveen cuidados maternales.

Las especies más venenosas se consideran una amenaza para la salud pública. Su picadura puede causar dolor, inflamación, ulceración o necrosis en la parte afectada. Pero no todo es nocivo: se ha demostrado que ciertos componentes del veneno de estos artrópodos poseen potencial terapéutico, ya sea como agentes antibacterianos, analgésicos o antitumorales.

—Fabio Cupul, Universidad de Guadalajara, México
—Julián Bueno, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, México
—Robert Mesibov, Universidad de Tasmania, Australia

JULIÁN BUENO (*cienpiés*); JESÚS MOLINARI (S. gigantea); FABIO CUPUL (*forcípulas y* D. linceci); LUCIO BONATO (D. carniolensis)

En la imagen de este ciempiés escolopendromorfo se aprecia la segmentación del cuerpo y la presencia de un par de patas en cada segmento.



El ciempiés escolopendromorfo *Scolopendra gigantea* (de unos 15 centímetros de largo) colgado del techo a la entrada de una cueva en Venezuela para capturar y alimentarse de murciélagos (*Mormoops megalophylla*).



Detalle de las forcípulas o colmillos en la placa cefálica (parte ventral de la cabeza) de un ciempiés escolopendromorfo. Las forcípulas resultan esenciales para cazar y someter a las presas; en su base se hallan las glándulas productoras de veneno neurotóxico.



Hembra de *Dicellophilus carniolensis*, un ciempiés geofilomorfo, enrollada sobre una masa de huevos para brindarles protección.



En las especies con ojos, estos pueden ser simples (detectan luz y sombras) o compuestos (para detectar movimiento), como los de este ciempiés escutigeromorfo, *Dendrothereua linceci*.

por Stefan Pohl Valero

Stefan Pohl Valero es profesor de historia de la ciencia en la Universidad del Rosario en Bogotá.



Termodinámica social

La relación entre física y sociedad a finales del siglo XIX

En 1910, el famoso historiador estadounidense Henry Adams expuso frente a sus colegas una teoría de la historia universal basada en la segunda ley de la termodinámica. No era la primera vez que se intentaba aplicar las leyes de las ciencias naturales al devenir histórico de la humanidad, pero a diferencia de sus antecesores (Herbert Spencer, Karl Marx y Friedrich Engels, por citar algunos) en esta ocasión el tono era eminentemente pesimista: Adams aseguraba que el desorden y la decadencia que se vislumbraban en las sociedades modernas no eran sino consecuencia del mismo proceso de disipación de la energía previsto por la segunda ley de la termodinámica y cuya fatal irreversibilidad había sido denominada por los físicos del siglo XIX como «la muerte térmica del universo». Uno de ellos, el inglés William Thomson (Lord Kelvin), había concluido medio siglo antes (1852) que, dado que toda actividad de la naturaleza significaba transformación de energía y que una parte de esta siempre se disipaba en forma de calor no aprovechable, era lícito afirmar que en un periodo finito de tiempo el universo habría alcanzado un estado de equilibrio térmico que impediría cualquier posibilidad de vida. La tendencia de la entropía a aumentar de forma inexorable podía leerse como una profecía cósmica.

Pero para muchos de los pensadores sociales del siglo XIX, confiados como estaban en el progreso continuo de la humanidad, la primera ley de la termodinámica parecía caracterizar mucho mejor el funcionamiento del universo y de la sociedad. El descubrimiento de que diferentes fenómenos de la naturaleza, como el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo, no eran sino manifestaciones de una misma energía universal que, aunque constante, se estaba transformando continuamente, se correspondía con las trasformaciones que estaban ocurriendo en la sociedad y que la estaban llevando por la senda del progreso. El desarrollo del universo y la sociedad estaban articulados por una misma ley natural que descartaba, de paso, explicaciones sobrenaturales de orden metafísico o teológico. En medio de un amplio debate público entre ciencia y religión, que tenía como telón de fondo la búsqueda de diversas posibilidades reformistas que abarcaban el Estado, las instituciones y la sociedad, la conservación de la energía —al igual que la teoría de la evolución— representó el mejor argumento para promover una visión naturalista del universo y para cuestionar valores tradicionales y reaccionarios de la sociedad decimonónica.

Cuando queremos explicar de manera sencilla las complejas relaciones entre ciencia, cultura y sociedad, los historiadores de la ciencia acudimos a ejemplos paradigmáticos que nos permiten explorar los diversos aspectos de estas relaciones. Uno de ellos, el más famoso tal vez, corresponde a la teoría de la evolución de Charles Darwin. Son conocidos los factores sociales que ayudaron a articular su teoría (las ideas poblacionales de Thomas Malthus, el liberalismo económico de su época, etcétera), así como la influencia de la misma en la forma de pensar, organizar y controlar a la sociedad (secularización, darwinismo social, eugenesia). Las historias generales sobre el siglo XIX y principios del XX incluyen en sus narrativas estos aspectos de la biología y el pensamiento social como un rasgo característico de la modernidad. Sin embargo, es muy poco frecuente encontrar análisis históricos que incluyan también el papel de la física en estos procesos. Como veremos a continuación, la historia de algo que nos parece tan técnico como la termodinámica ofrece también un excelente ejemplo para problematizar las férreas fronteras con las que solemos separar la esfera científica de la esfera sociocultural y política, y para reflexionar sobre la forma en que se configuró nuestra modernidad.



Ilustración del cuerpo humano concebido como una máquina térmica realizada por el fisiólogo alemán Fritz Kahn para su libro de 1926 *Das Leben des Menschen* («La vida del hombre»).

DE *DAS LEBEN DES MENSCHEN III*. FRITZ KAHN, EDITORIAL FRANCKH'SCHE, STUTTGART, 1926

Termodinámica y metáforas sociales

La historia cultural de la física ha señalado el papel que, en la formulación de las leyes de la termodinámica, desempeñaron aspectos como la revolución industrial, la

tradición ingenieril de las máquinas, la filosofía romántica de la naturaleza o la economía política. También se ha analizado la forma en que percepciones y metáforas sociales y teológicas influyeron en el pensamiento de los filósofos naturales implicados en el desarrollo de la nueva ciencia de la energía. Asimismo, una vez establecidas sus leyes, estas sirvieron para caracterizar, a través de metáforas y analogías, el funcionamiento de diversos aspectos de la sociedad.

Por ejemplo, para numerosos divulgadores científicos y pensadores sociales liberales, la muerte térmica del universo fue utilizada para caracterizar —y condenar— las consecuencias de una sociedad comunista. En la década de 1870 y después de los sucesos de la Comuna de París, las élites intelectuales europeas veían con profunda preocupación la consolidación de movimientos obreros ejemplificados por la Asociación Internacional de Trabajadores, fundada en 1864. Desde un discurso capitalista decimonónico, un universo fatalmente equilibrado en términos de energía fue utilizado como un escenario que representaba a la perfección una sociedad comunista. El equilibro de la energía en el universo era análogo a una sociedad igualitaria, sin diferencias sociales; sus consecuencias, idénticas: la muerte térmica y la muerte social y económica. Como lo expresaron los científicos y divulgadores británicos Peter Tait y Belfourt Stewart en un libro muy popular sobre la ciencia de la energía de finales del siglo XIX: «El calor es el comunista por excelencia de nuestro universo, y sin duda es el que llevará al sistema presente a su fin».

Asimismo, la metáfora de la sociedad como una máquina térmica sirvió para justificar las diferencias sociales entre la burguesía y la clase obrera. Tal como lo aseguraba en 1891 el químico español Laureano Calderón frente al público del Ateneo de Madrid, las desigualdades sociales estaban impuestas por una ley natural. Calderón recurría a la idea expuesta por el ingeniero francés Sadi Carnot, que postulaba que era necesaria una diferencia de temperaturas para que una máquina térmica funcionara. Este postulado, que fue la idea original que desembocó en la ley de la entropía, demostraba que para transformar energía calorífica en energía mecánica era necesario que el calor pasara de un cuerpo caliente a uno frío. Para el químico, esta diferencia térmica representaba la configuración social de un Estado que promovía un comportamiento individualista y que respaldaba el espíritu competitivo del capitalismo. El intentar suprimir las diferencias de clases significaba para Calderón hacer inservible la máquina social.

Los argumentos termodinámicos respaldaron objetivos políticos y sociales muy diversos. El médico ucraniano Sergei Podolinsky realizó en la década de 1880 un detallado estudio termodinámico de la agricultura, que pretendía apoyar la necesidad de un orden social informado por las ideas socialistas de Karl Marx y Friedrich Engels. Para Podolinsky, la posible muerte térmica del universo era evitable si se utilizaba correctamente la energía del universo. Por tanto, era esencial que la organización de la sociedad se convirtiera en una cuestión de optimización energética. Después de un análisis energético de las diferentes formas sociales de producción, Podolinsky aseguraba que el capitalismo disipaba una gran cantidad de energía que se hallaba a disposición de la humanidad, tal como una máquina deficiente. Solo a través de una forma de producción socialista en la que existiera una asociación igualitaria de las fuerzas de trabajo, se lograría que la gran máquina social se acercara a su funcionamiento óptimo y fuera, por tanto, capaz de acumular energía aprovechable. Desde esta perspectiva, el socialismo era la clave para evitar la muerte térmica del universo.

La ética de la energía

Al tratar de legitimar el socialismo mediante los principios de la termodinámica, el texto de Podolinsky reflejaba a su vez el modo en que la sociedad empezaba a ser concebida como un sistema de producción en el que su progreso material y moral era mensurable en términos energéticos. Aprovechar al máximo la energía que la naturaleza le dispensaba al hombre se convirtió en uno de los nuevos valores de la sociedad moderna de finales del siglo XIX. Y al igual que la sociedad, el cuerpo humano también se conceptualizó como una máquina térmica, en la que podía intervenirse para lograr su optimización energética.

Desde esa lógica, uno de los conceptos centrales de la economía política, la «fuerza de trabajo», empezó a entenderse como un valor equivalente a cualquiera de las otras energías de la naturaleza destinadas a accionar el sistema fabril de las nuevas ciudades industriales. Este concepto se convirtió así en una medida cuantitativa del gasto de la energía humana en la producción, en un valor físico completamente separado de los aspectos sociales de las formas y condiciones del trabajo. La «cuestión obrera» pareció entonces un problema solucionable exclusivamente a través de las ciencias naturales. A finales del siglo XIX, expertos en fatiga, nutrición y fisiología del motor humano buscaron una supuesta solución «neutral» y objetiva a los conflictos políticos y económicos propios de las ciudades industrializadas. Esta aproximación científica buscó los medios para maximizar la productividad mientras se conservaban las energías de las clases trabajadoras. Diversas reformas sociales relacionadas con los programas de higiene social, la alimentación de la población (medida en calorías), la legislación de accidentes industriales, el sistema de pago a los obreros y la duración del día laboral estuvieron informadas por la doctrina del productivismo. Doctrina que el químico, industrial y filósofo social belga Ernest Solvay, uno de sus principales representantes, no dudó en llamar «el equivalente social de la energética». En última instancia, un reduccionismo de los individuos a aquello que podía ser cuantificado como una mercancía: un sistema contable energético-material de entrada de combustible y salida de trabajo.

Sirva este breve repaso histórico para recordarnos que la ciencia es una actividad humana influenciada por el contexto social donde es producida y que, a su vez, ayuda a reconfigurar ese contexto. Si la metáfora de la sociedad como un organismo biológico constituyó un elemento central del darwinismo social, la de la sociedad y el cuerpo como una máquina térmica lo fue para la termodinámica social. Tal vez no estaba tan desatinado Jorge Luis Borges cuando mencionó que la historia universal es la historia de unas cuantas metáforas.

PARA SABER MÁS

More heat than light: Economics as social physics, physics as nature's economics. P. Mirowski. Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

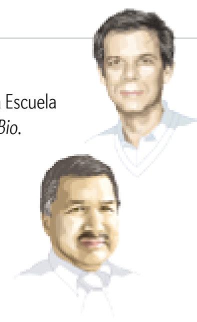
The human motor: Energy, fatigue, and the origins of modernity. A. Rabinbach. University of California Press, Berkeley, 1992.

The science of energy: A cultural history of energy physics in Victorian Britain. C. Smith. The University of Chicago Press, Chicago, 1998.

Energy forms: Allegory and science in the era of classical thermodynamics. B. Clarke. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 2001.

Energía y cultura: Historia de la termodinámica en la España de la segunda mitad del siglo XIX. S. Pohl Valero. Editorial Pontificia Universidad Javeriana/Universidad del Rosario, Bogotá, 2011.

por Arturo Casadevall y Ferric C. Fang



Arturo Casadevall ostenta la cátedra Leo y Julia Forchheimer de microbiología e inmunología en la Escuela de Medicina Albert Einstein. Es redactor jefe de *mBio*.

Ferric C. Fang es profesor de medicina y microbiología experimental en la Universidad de Washington y redactor jefe de *Infection and Immunity*.

Todo para el primero

La intensa competencia entre científicos ha suscitado abusos. ¿Habrá un proceder mejor?

Cuando Isaac Newton desarrolló la teoría de la gravitación y el cálculo diferencial, su recompensa fue muchísimo mayor que las opciones sobre acciones de una empresa en germen o una generosa gratificación a fin de año. Sus pares honraron el mérito de su trabajo y le reconocieron la autoría; más tarde, lo haría también el mundo entero. Mucho ha cambiado la ciencia desde Newton, pero este hecho fundamental, no. En ciencia, el premio sigue siendo el reconocimiento de prioridad en la autoría del trabajo realizado.

¿Cómo ha de atribuirse el mérito científico? La cuestión entraña graves consecuencias para el modo de hacer ciencia y el modo en que esta retorna a la sociedad lo invertido en ella. Desde los primeros tiempos, el derecho a ostentar un descubrimiento se asigna a quien primero lo notifica. Esta «norma de prioridad» ha dado pie a pintorescas disputas —Newton se enzarzó con Gottfried Wilhelm Leibniz, que reclamaba la invención del cálculo— pero, en general, la regla ha ido funcionando bien. Desde hace algún tiempo, sin embargo, la intensa competición entre científicos ha provocado conflictos y abusos, y hemos empezado a preguntarnos si no existirán soluciones preferibles.



En el mejor de los casos, la regla de prioridad acicatea una saludable competencia, una poderosa motivación para que los científicos innoven y se esfuercen en resolver cuanto antes los problemas. Los economistas consideran que el conocimiento científico es un bien común, lo que supone que los competidores pueden servirse libremente de tal conocimiento en cuanto es publicado. La regla de prioridad conlleva un vigoroso incentivo para la compartición de conocimientos. Se cree que también contribuye a asegurarle a la sociedad un retorno óptimo de su inversión en ciencia, porque las recompensas van a aquellos científicos que más la benefician.

Pero la regla de prioridad, con su «todo para el primero», no carece de inconvenientes. Puede inducir al secretismo, a prácticas chapuceras, a deshonestidades y a un excesivo énfasis en sucedáneos de la calidad científica, como es la publicación en revistas de renombre. Hace unos meses, los redactores de *Nature* exhortaron a los científicos a cuidar más sus trabajos. Entre otras pruebas, citaron la creciente laxitud, la escasa reproducibilidad de los hallazgos publicados, errores en datos numéricos, procedimientos de control inadecuados, descripciones metodológicas incompletas y análisis estadísticos inaceptables.

Al ser la financiación cada vez más escasa, se intensifica la refriega por conseguirla, y los inconvenientes de la regla de prioridad pueden estar empezando a contar más que sus ventajas. Las tasas de éxito de los científicos que solicitan financiación de los Institutos Nacionales de Salud estadounidenses han caído hasta un mínimo absoluto. En consecuencia, se ha visto un empinado repunte de insana concurrencia entre científicos, parejo a una proliferación impresionante de las publicaciones retractadas por falsedad o error. Ciertos escándalos recientes hacen pensar en el dopaje en los deportes, donde la desproporción de las recompensas al vencedor incentiva a los tramposos.

Nunca, en la ciencia, ha sido tan grande la importancia del trabajo en equipo. Estudios de publicaciones de los últimos cincuenta años dejan ver que predominan cada vez más los equipos y que son sus investigaciones las de mayor impacto. Redes, colaboraciones y consorcios resultan esenciales para abordar problemas interdisciplinarios de gran talla, como el Proyecto Genoma Humano. La regla de prioridad puede estar socavando este proceso.

Nunca se ha dudado en serio de que la regla de prioridad sea lo adecuado. Pero ¿resulta idónea para la moderna era científica, en la que se opera en grandes equipos y se prima la cooperación? Un sistema distinto, que celebre los esfuerzos del equipo en hallar soluciones, puede funcionar mejor. La industria, que antepone las metas de sus colectivos a los logros individuales, y los Institutos Nacionales de Salud, que en el Proyecto de Investigación Intramural alientan la asunción de riesgos y las sinergias entre industria y academia, ofrecen ejemplos dispares, pero instructivos. Los científicos seguramente trocarían de buen grado las ventajas de la regla de prioridad (recompensa individual) por otro sistema que ofreciera estabilidad en el sostén económico, colegialidad, mayor libertad en el intercambio de información, juego más limpio, trabajo más riguroso y colaboración. Tal descubrimiento sería enormemente beneficioso, tanto para la tarea científica como para la sociedad a la que sirve.

CARL WIENS

por Hervé This

Hervé This pertenece al grupo de gastronomía molecular del Instituto AgroParisTech y es director científico de la Fundación Ciencia y Cultura Alimentaria de la Academia de las Ciencias francesa.



El sabor del pollo asado

El gusto de esta carne varía con la temperatura de cocción. Si queremos evitar un posterior sabor a recalentado, hay que cocerla a temperatura elevada

¿Qué hay más simple que un pollo asado? Se toma un pollo, se ensarta y se calienta. Su piel se torna crujiente, la grasa funde, se desprenden sus jugos y la carne adquiere un destacable sabor. Pero, ¿qué sabor? Derek Byrne y sus colaboradores, de la Real Universidad Veterinaria y Agronómica de Dinamarca, demostraron hace unos años que el sabor del pollo asado dependía en gran manera de la temperatura de cocción.

Desde finales del decenio de los sesenta, los químicos daneses se interesaron por el sabor a recalentado de las carnes (los productos que vuelven a calentarse tras un período de conservación en frío adquieren olor a recalentado). El tema quedó olvidado hasta los años ochenta. Se atribuyó entonces, de forma correcta, al fenómeno de la autooxidación, o enranciamiento, de las grasas.

Esa reacción de autooxidación constituye un ejemplo elemental en química. En ella intervienen radicales libres, moléculas que reaccionan porque uno de sus electrones está desapareado. La formación de uno de estos radicales engendra nuevos radicales, lo que propaga la reacción y conduce a un enranciamiento rápido, sobre todo cuando está catalizado por el hierro, omnipresente en la cocina (en los utensilios y en la sangre de las carnes).

Las grasas que más se oxidan en la carne son los fosfolípidos que componen las membranas celulares. Estos contienen insaturaciones, zonas en las que los átomos de carbono del esqueleto molecular se hallan unidos por dobles enlaces. Dichas insaturaciones determinan su oxidabilidad, que aumenta por este orden: cordero, buey, cerdo, aves y pescado. A esta oxidación de las grasas se suman las reacciones de Maillard, que modifican las proteínas y provocan la desaparición de los aromas cárnicos, sustituyéndolos por olor a quemado.

Se sabe desde hace más de veinte años que las cocciones a temperaturas elevadas (más de 100 ºC) inhiben la aparición del sabor a recalentado gracias a las propiedades antioxidantes de las melanoidinas, ciertos compuestos oscuros que se forman en las reacciones de Maillard. El mecanismo que subyace bajo este efecto se descubrió más tarde.

D. Byrne, W. Bredit y M. Martens, en Dinamarca, junto con David Mottram, en Bristol, se repartieron el trabajo. Realizaron los análisis sensoriales y químicos de carnes (supremas de ave) cocidas a diferentes temperaturas (160 ºC, 170 ºC, 180 ºC, 190 ºC) y almacenadas durante más o menos tiempo (entre uno y cuatro días), antes de recalentarlas durante un tiempo determinado a 140 ºC. Para los análisis de los olores, se establecieron una lista de descriptores: cartón, aceite de lino, caucho/azufrado, olor a pollo, asado, rancio, aceite vegetal, nueces... Los descriptores de sabores se limitaron a los siguientes: azucarado, ácido, amargo, salado, umami y metálico. Al propio tiempo, los productos se analizaban químicamente.

Las correlaciones entre la caracterización sensorial y los otros parámetros experimentales mostraron que los olores a cartón, aceite de lino, caucho/azufrado y rancio aumentaban con el tiempo de conservación en frío, siendo las carnes cocidas a temperaturas inferiores las que presentaban en mayor medida este defecto. El olor y el sabor a tostado aumentaban con la temperatura de cocción, pero —y este hallazgo interesa a los cocineros más precisos— se obtenían gustos diferentes al realizar las cocciones a distintas temperaturas. Las carnes eran más amargas y astringentes cuando se cocían a alta temperatura.

Se identificaron los compuestos responsables de esos gustos y aromas. La mayor parte figuraban ya en la lista de productos de oxidación de las reacciones de Maillard. Como era de prever, se encontraron dichos compuestos en cantidades mayores en las muestras de pollo que habían estado más tiempo conservadas en frío. Los químicos observaron el efecto beneficioso de las moléculas que contienen un grupo tiol (un átomo de azufre ligado a un átomo de hidrógeno): estas se oxidan fácilmente, por lo que actúan a modo de antioxidantes, al igual que ciertos productos de las reacciones de Maillard.

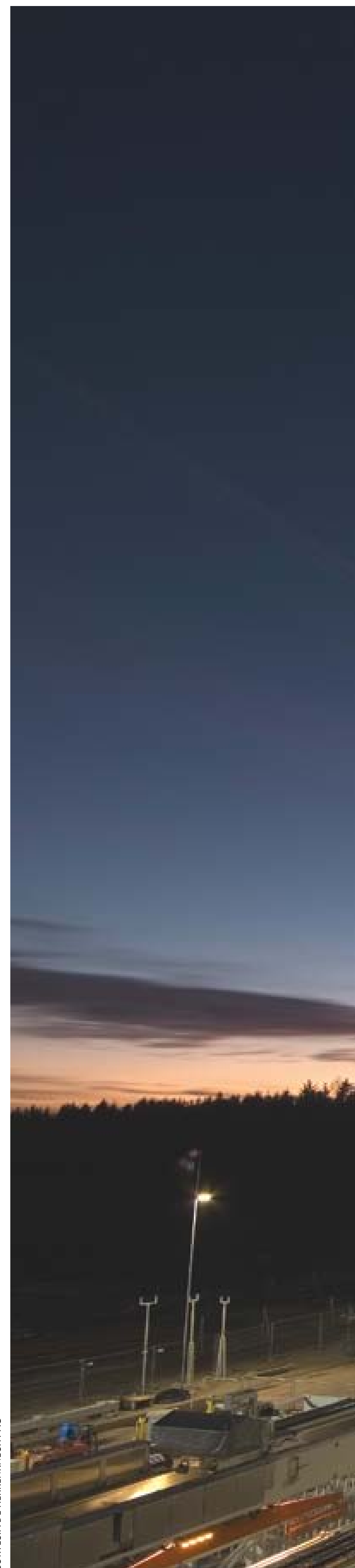
Nos encontramos aquí con una nueva refutación de la discutible corriente naturista que preconiza que todo lo crudo es bueno para la salud: no es solo que la cocción mate los microorganismos presentes en la superficie de las carnes y los parásitos de su interior, sino que lucha contra las oxidaciones... y confiere, además, un sabor delicioso a las carnes a la brasa.



ROBYNMAC/ISTOCKPHOTO

Karl Urban ha estudiado ciencias de la Tierra en Tubinga y Reikiavik. En la actualidad trabaja como periodista científico.





CORTESÍA DE HERRENKNECHT AG

ENERGÍA

Sistemas geotérmicos mejorados

La idea de aprovechar el calor interno de la Tierra como fuente energética no es nueva, pero lejos de las zonas volcánicas la técnica sigue ofreciendo resultados modestos

Karl Urban

El cartel no invita mucho a detenerse: «Atención: Zona geotérmica. Peligro de explosión». El suelo amarillo sulfuroso de las inmediaciones del estanque Krýsuvík, en el sudoeste de Islandia, desprende tanto calor que el agua borbotea en los pozos de lodo. Con cuidado, atravesamos este espectáculo natural a través de un resbaladizo camino de madera. Desprende un desagradable olor a azufre, originado por las emanaciones volcánicas de las profundidades de nuestro planeta.

EN SÍNTESIS

Durante decenios, el calor del interior de la Tierra solo ha podido aprovecharse en ciertos lugares. En la actualidad, casi todas las grandes centrales geotérmicas se encuentran en zonas volcánicas.

Hoy ya existen nuevas técnicas que permiten aprovechar el calor del subsuelo en zonas secas o carentes de actividad volcánica. En Centroeuropa ya existen varias centrales de nueva generación.

A diferencia de la energía solar o eólica, la geotérmica proporciona un suministro estable, pero su rendimiento es exiguo y muy variable. En ocasiones, las excavaciones han llegado a provocar seísmos leves.



Central de Dürrnhaar, en Baviera: El pozo, de unos 4500 metros de profundidad, aprovecha una abundante reserva de aguas termales bajo un terreno kárstico. En la región de Múnich, este estrato rocoso ha propiciado una ampliación de las generación geotérmica de calor y electricidad.

Paisajes inhóspitos como el de Krýsuvík proveen a Islandia de una energía de procedencia mayoritariamente local: el estado insular cubre un 62 por ciento de sus necesidades energéticas gracias al subsuelo. La geotermia se aprovecha no solo para calentar hogares, piscinas o las nevadas calles de Reikiavik, sino que genera también una cuarta parte de la energía eléctrica que consume el país. El modelo islandés lleva intentando imitarse desde hace años, sobre todo en países con zonas volcánicas activas. En todo el mundo, el rendimiento de las centrales geotérmicas equivale al de unas diez centrales nucleares. El 80 por ciento de ellas se encuentra en el Cinturón de Fuego del océano Pacífico, cuya actividad tectónica alimenta los volcanes de Japón, Indonesia, Filipinas y Nueva Zelanda. Por las mismas razones, el subsuelo de la costa oeste de Estados Unidos, El Salvador o México ha hecho de la geotermia una posibilidad energética digna de tomar en consideración. Solo en estos países, se prevé que la explotación geotérmica crezca en dos tercios de aquí a 2015.

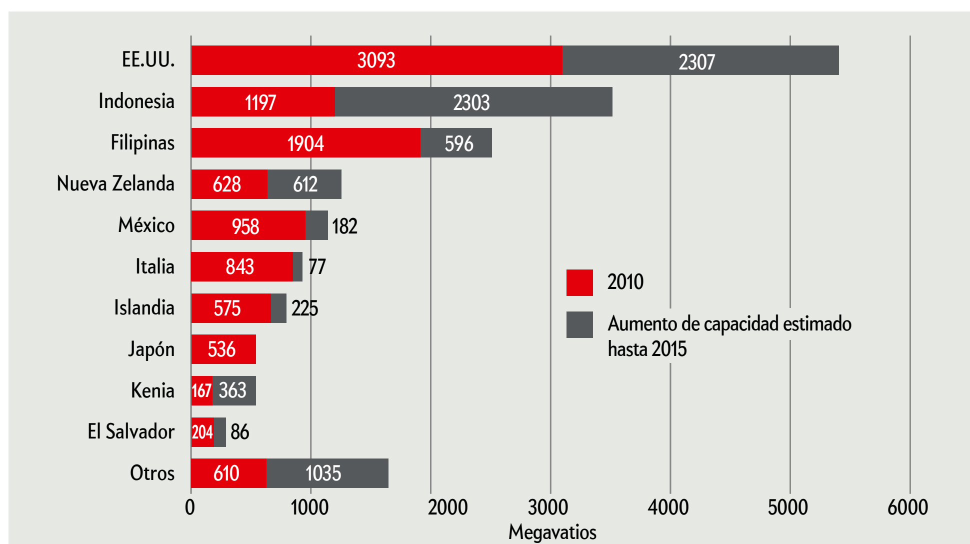
Si se excava lo suficiente, la roca caliente aparece también en otras partes del mundo, como en Centroeuropa. En Alemania, hace ya décadas que los ingenieros se esfuerzan por entender los secretos del subsuelo, en gran parte inexplorado, con miras al suministro energético. Hasta ahora, sin embargo, el éxito ha sido moderado. A principios de 2012, el país de referencia en ampliación de energías renovables solo producía unos 7,3 megavatios de origen geotérmico, el equivalente a la potencia nominal de unos pocos aerogeneradores. Y ello a pesar de que, a pocos kilómetros de profundidad, la corteza terrestre se halla tan caliente como las burbujeantes calderas de lodo islandesas.

El núcleo terrestre constituye el motor térmico del planeta desde sus inicios, hace 4600 millones de años. Su capa más externa, en estado líquido, se encuentra a unos 5000 grados Celsius. La diferencia de temperatura con la superficie genera enormes flujos convectivos, los cuales transportan de manera ininterrumpida energía térmica hacia la corteza, donde mantienen en funcionamiento la tectónica de placas. A la hora de explotar ese calor como fuente de energía, sin embargo, la distribución térmica del planeta ya no se presenta tan conveniente. Más del 66 por ciento de esa energía calorífica se concentra a lo largo de las dorsales oceánicas interiores, por lo que se pierde sin casi ninguna posibilidad de aprovechamiento por nuestra parte. Las islas volcánicas situadas sobre tales cordilleras oceánicas, como Islandia o Nueva Zelanda, constituyen una excepción.

En las regiones continentales más estables, no obstante, la corteza terrestre alcanza asimismo temperaturas lo suficientemente elevadas. Ello se debe a la existencia de una fuente energética adicional: las desintegraciones radiactivas de los isótopos de uranio, torio y potasio que, de manera natural, descansan allí desde hace millones de años. El conjunto de la energía geotérmica potencialmente explotable no es, por tanto, «renovable» en un sentido estricto, si bien a efectos prácticos la situación no cambiará de manera apreciable durante los próximos milenios.

Al principio, el calor de las profundidades solo pudo aprovecharse allí donde existían cámaras magmáticas. En 1904, en la zona volcánica de Larderello, en la Toscana, el empresario Piero Ginori Conti llevó a cabo los primeros intentos de obtener electricidad haciendo pasar a través de una dinamo el vapor que emanaba del suelo. En Alemania, la geotermia fue considerada como fuente energética del futuro desde muy temprano. Ya a comienzos de la Revolución Industrial inspiró los pronósticos del geólogo Bernhard von Cotta. El experto en minería opinaba que, una vez que los yacimientos de carbón se hubiesen agotado, el calor interior de la Tierra debería llevarse a la superficie a fin de «templar las viviendas e incluso proporcionar calefacción a las máquinas». Ya entonces los mineros sabían que, al excavar en el subsuelo, la temperatura aumentaba a un ritmo de unos 30 grados por kilómetro. A unos tres kilómetros de profundidad, por tanto, la roca ya debía rozar los 100 grados Celsius. Cómo transportar ese calor hasta la superficie, sin embargo, distaba de estar claro. Los geólogos debían entender primero las peculiaridades geotérmicas de cada zona, ya que el flujo de calor varía de unas regiones a otras debido a los procesos tectónicos.

En la fosa del Rin (entre las ciudades de Fráncfort y Basilea), la corteza terrestre se halla sometida a una tensión considerable. Aunque no llega a fracturarse, es más delgada y se encuentra a mayor temperatura que en otras zonas. Por otro lado, en las tierras bajas del norte de Alemania o en el flanco septentrional de la región alpina, la corteza sufre la presión de sedimentos depositados a lo largo de cientos de millones de años, lo que también la hace más permeable al flujo de calor desde el interior. Tanto es así que, en 2003, la Oficina de Evaluación Técnica alemana (TAB, por sus siglas en alemán) atribuyó al país —volcánicamente inerte— unas reservas de energía geotérmica exorbitantes. Según



La capacidad de producción geotérmica está creciendo con rapidez en todo el mundo; sobre todo, en aquellos países con acceso a zonas volcánicas activas.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT SEGÚN RUGGERO BERTANI, ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA INTERNACIONAL (IGA), ASOCIACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA (GEA)

Entre las fuentes renovables, la energía geotérmica representa aún un papel modesto. Su ventaja reside en que, a diferencia de otras fuentes, proporciona un suministro muy estable.

Técnica	Potencia		Producción anual		Disponibilidad
	Gigavatios	Porcentaje	Teravatios hora	Porcentaje	Porcentaje
Hidráulica	1010	76,4	3716	83,0	42
Biomasa	62	4,6	282	6,3	52
Eólica	198	14,9	364	81	21
Geotérmica	11	1,1	67	1,5	77
Fotovoltaica	40	3,0	49	1,1	14
Total	1321	100	4478	100	

aquel informe, con la tecnología existente podrían extraerse del subsuelo unos 1200 exajulios, suficientes para cubrir las necesidades energéticas del país durante cinco siglos.

Las primeras centrales de energía geotérmica hubieron de hacer frente a dos problemas: por un lado, a la dificultad que conlleva excavar pozos de profundidad kilométrica; por otro, a la gran cantidad de sales presentes en las aguas subterráneas. En general, el agua caliente se extrae por un pozo de sondeo y se emplea para generar electricidad y calor. En el proceso, el líquido se enfría, tras lo cual se devuelve a las profundidades por un segundo pozo. Las aguas termales con un elevado contenido en sal, sin embargo, no resultan adecuadas para propulsar una turbina. En tales casos, el calor se transfiere primero a otro fluido, como un disolvente orgánico con un punto de ebullición bajo. Solo gracias a este proceso, conocido como ciclo orgánico de Rankine, y al asociado ciclo de Kalina sobre una base de amoníaco, comenzaron a operar las primeras centrales geotérmicas.

Hoy, la central alemana más exitosa opera en Unterhaching, un municipio de unos 23.000 habitantes cercano a Múnich. Desde 2004, la ciudad ha aprovechado las circunstancias favorables del terreno kárstico sobre el que se alza, poroso y permeable al agua termal. Cada segundo, la central extrae hasta 150 litros de agua a más de 120 grados Celsius. Con ello genera unos 47 gigavatios hora de calor y 22 gigavatios hora de electricidad al año, lo suficiente para cubrir las necesidades de calefacción y consumo eléctrico de dos tercios y una cuarta parte de los hogares, respectivamente.

GRIETAS ARTIFICIALES

Más trabajo exigió la construcción de la central de Landau, conectada a la red en 2007. Al hallarse sobre la fosa del Rin, la ciudad no dispone de acceso a una reserva abundante de aguas termales. Los geólogos solo sabían que la roca subyacente se había fragmentado millones de años atrás, por lo que gozaría de cierta permeabilidad. Allí la compañía inyectó agua a tres kilómetros de profundidad a fin de provocar fisuras adicionales en la roca y, de esa manera, facilitar el flujo de agua y la absorción de calor. Los objetivos se cumplieron, pero dentro de ciertos límites: hoy la central extrae unos 60 litros de agua por segundo, produce unos 25 gigavatios hora de energía eléctrica al año y suministra calor a unos pocos cientos de hogares.

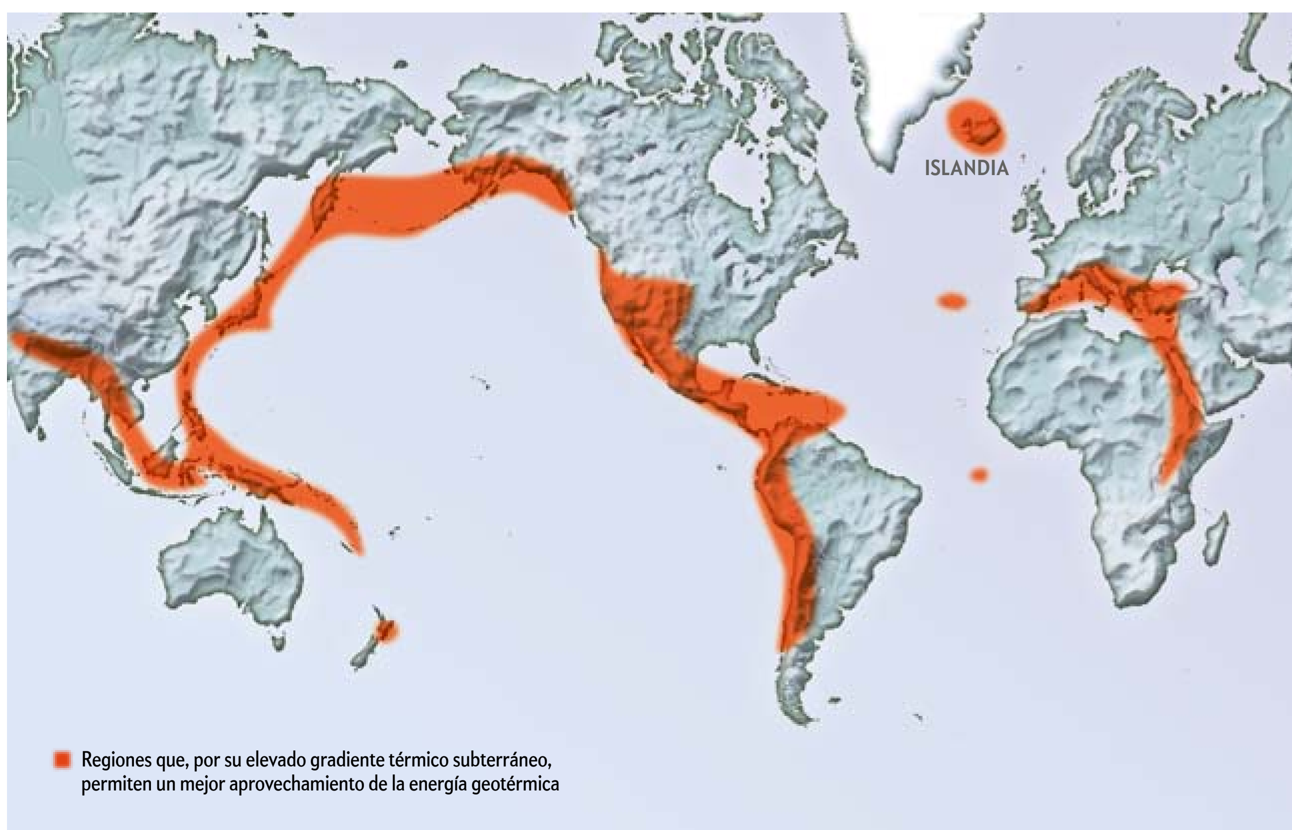
Con todo, las centrales de ese tipo apenas darán abasto para lograr el tesoro prometido por la TAB. Según su informe, las aguas termales como las de Unterhaching representan solo el 1 por ciento del potencial que ofrece la energía geotérmica, mientras que las zonas irregulares y parcialmente permeables, como la de Landau, proporcionarían el 4 por ciento. El 95 por ciento restante residiría en roca caliente, pero muy densa y sin apenas agua.

El problema se conoce desde la década de los sesenta. Ya entonces se propuso la idea de permeabilizar el subsuelo más denso para permitir el paso del agua; algo que, no obstante, solo puede conseguirse mediante la fuerza bruta. En 1964, el físico George Kennedy llegó incluso a considerar la posibilidad de demoler la roca con una bomba atómica subterránea. La idea aca-



Las excavadoras necesitan meses para llegar a una profundidad de entre tres y cinco kilómetros. Las brocas, templadas con diamantes de uso industrial, deben cambiarse regularmente.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT SEGÚN LADISLAUS RYBACH Y REN21, RENEWABLES 2011: GLOBAL STATUS REPORT (tabla); CORTESÍA DE H. ANGERS SÖHNE (excavadora)



Las regiones más prometedoras para el aprovechamiento de la energía geotérmica se encuentran sobre los límites de placas tectónicas activas. Lejos de estos, sin embargo, nuevos métodos permiten también explotar el calor de las profundidades.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT Y EMDE-GRAFIK SEGÚN ORKUSTOFNUN (AUTORIDAD NACIONAL PARA LA ENERGÍA DE ISLANDIA), 2009

bó en el olvido una vez que la euforia nuclear tocó a su fin. Otra posibilidad, sin embargo, consiste en inyectar agua a presión para agrietar grandes extensiones de roca. El procedimiento, denominado fracturación hidráulica, fue utilizado primero por las compañías de petróleo y gas natural para extraer la materia prima más firmemente unida a la roca [*véase* «Los inconvenientes de la fracturación hidráulica», por C. Mooney; Investigación y Ciencia, enero de 2012]. La misma técnica permite también crear acuíferos artificiales para que el agua fluya y absorba el calor de la roca antes de ser bombeada de nuevo hacia la superficie. Esta clase de instalaciones recibe el nombre de sistemas geotérmicos mejorados (EGS, por sus siglas en inglés).

Fueron varios los intentos que precedieron a la aparición de los primeros EGS operativos. Los ingenieros del Laboratorio Nacional de Los Álamos, en EE.UU., quebraron en cierta ocasión la roca de una chimenea volcánica, pero no lograron conectar las grietas de los pozos, lo que les impidió establecer un circuito permanente de agua. Una tentativa posterior en Hijiori, en Japón, también fracasó: dos pozos se habían acercado demasiado, lo que provocó un «cortocircuito» hidráulico y el agua inyectada por el primero pasó directamente al segundo sin calentarse en el camino.

En 1987 comenzó a construirse una central experimental europea en la localidad alsaciana de Soultz-sous-Forêt. Allí los ingenieros llegaron al basamento de la roca sedimentaria y aumentaron la permeabilidad del granito con medios hidráulicos. Desde el principio, el objetivo del proyecto consistió en analizar con detalle los procesos que tales acciones desencadenaban en la roca. Hoy, la central suministra a la red la modesta cantidad de 1,5 megavatios. Varios proyectos de EGS en todo el mundo intentan emular los éxitos de la planta alsaciana, la primera en lograr un entramado de grietas aprovechable con una superficie de tres kilómetros cuadrados. Esta última característica pudo verificarse a partir de las suaves sacudidas detectadas en la superficie terrestre.

Aunque imperceptibles para el ser humano, esos microseísmos suponen una herramienta diagnóstica de gran importancia. Si se regula con tino la presión del agua en el pozo, las grietas se ramifican y conforman un intercambiador de calor óptimo. Pero, si la presión aplicada resulta excesiva, las sacudidas pueden amplificarse y tornarse apreciables. En la primera central comercial de tipo EGS de Europa, construida en las afueras de Basilea, la inyección de agua a alta presión provocó en 2006 un terremoto de magnitud 3,4 en la escala de Richter, lo cual condujo al procesamiento del director del centro. Aunque fue absuelto, la planta acabó cerrándose por motivos cautelares. (En general, los terremotos de magnitud inferior a 4 no suelen provocar daños.)

En 2009, también la instalación de Landau hubo de enfrentarse a la oposición surgida a consecuencia de la irrupción de un temblor. A pesar de que este fue unas diez veces menos intenso que el de Basilea (su magnitud ascendió a 2,7), sorprendió tanto a vecinos como a la operadora de la central. Poco después, varias iniciativas ciudadanas se opusieron a otros proyectos similares en la fosa del Rin. El Gobierno de Renania-Palatinado instituyó un proceso de mediación a raíz del cual se fraguó, más de un año después, un acuerdo entre opositores y defensores. Según este, las instalaciones geotérmicas fu-

turas deberían planificarse, construirse y operarse de manera más transparente.

Las compañías argumentan que la aparición de seísmos perceptibles responde a las dificultades propias de una técnica incipiente. Levantar una central geotérmica puede tardar hasta cinco años, por lo que hasta ahora no ha habido tiempo suficiente para entender cómo reacciona la roca a las inyecciones de agua a presión. Se trata de un problema básico en geología: el comportamiento del subsuelo raras veces ha podido predecirse con exactitud antes de perforarlo. Así quedó patente en el curso de una investigación realizada en Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Hannover. A fin de abocardar las perforaciones y evaluar la reacción de la roca ante las fracturas, los expertos inyectaron agua a muy altas presiones. Sin embargo, los sismómetros más sensibles apenas registraron sacudida alguna.

EVITAR LOS TEMBLORES

Los científicos intentan deducir un patrón de reacciones adaptado a otras regiones a partir de los datos del grupo de Hannover y otros estudios. El objetivo consiste en bombear agua hacia las profundidades con la mayor rapidez posible, sin que ello provoque temblores perceptibles. Hoy en día existe una tupida red de sismómetros que, con cada nuevo pozo, mide las vibraciones provocadas en la superficie de cara a dirigir los trabajos. Sin embargo, en ocasiones pueden pasar días o incluso semanas entre el proceso de inyección de agua y los temblores, lo cual dificulta las tareas. Por ello, y sobre todo en la fosa del Rin, será casi imposible excluir en un futuro terremotos perceptibles. Como mínimo, en la inversión de cada central deberían presupuestarse indemnizaciones para cubrir la eventualidad de provocar daños menores en los edificios de la zona.

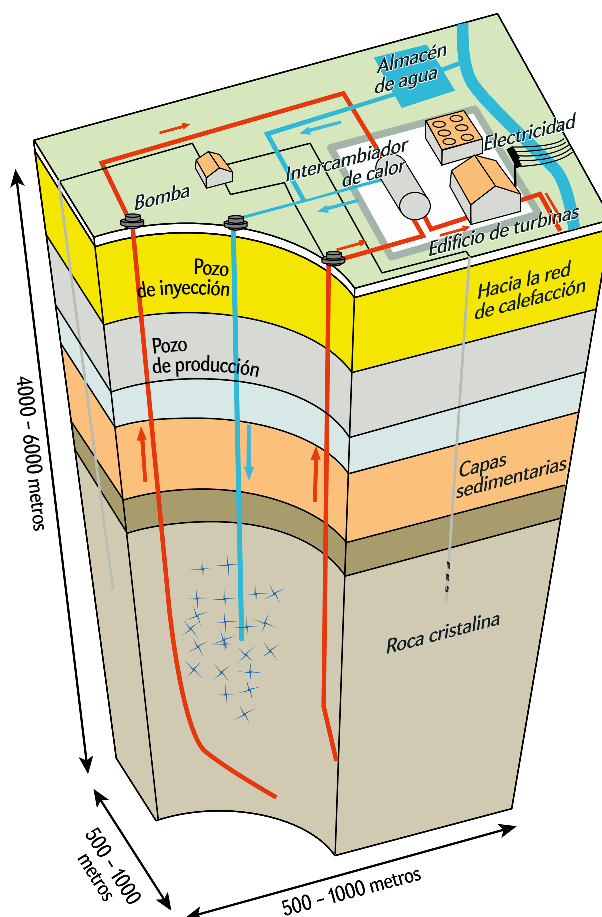
En Alemania, los costes de la energía geotérmica de profundidad se han mantenido hasta ahora invariablemente altos, si bien por otras razones. Mientras que las bonificaciones a la energía solar, eólica o procedente de biomasa se han venido reduciendo desde hace años a consecuencia del avance experimentado por dichas técnicas, los incentivos a la geotermia aumentaron en el diciembre de 2011 por segunda vez consecutiva. En realidad, las políticas de primas a las renovables persiguen hacerlas competitivas mediante una rebaja paulatina de las subvenciones.

Además, el sector de la energía geotérmica se enfrenta continuamente con nuevos problemas. En la central de Landau, el pozo de inyección y el de extracción se taladraron a una distancia mutua considerable para impedir que el agua del primero enfriase la del segundo (y evitar un cortocircuito hidráulico como el ocurrido en Hijiori). Sin embargo, esa precaución provocó temblores: el agua reconducida se topó en las profundidades con rocas poco permeables, lo cual generó una presión demasiado elevada y obligó a la operadora a limitar el funcionamiento de las bombas. Ahora, una solución para recuperar la eficacia planificada de la central podría consistir en bifurcar el segundo pozo, ya que de ese modo tal vez se aliviase la presión en las rocas profundas.

Incluso la exitosa central de Unterhaching se habría construido hoy bajo muchas más precauciones que las que se tomaron en su momento. Hasta hace apenas unos años, no resultaba fácil perforar de manera fiable una zona ya fracturada —y por eso productiva— como la que resguarda las aguas termales bávaras. La perforación en Unterhaching se llevó a cabo a partir de una reconstrucción bidimensional del subsuelo relativamente poco precisa. Desde entonces, las técnicas de cartografía subterránea han experimentado grandes avances y la resolución espacial de los métodos de exploración subterránea ha mejorado en un factor diez. En principio, ello debería facilitar la planificación de nuevas centrales.

Sin embargo, no cabe esperar que la energía geotérmica cobre un protagonismo mucho mayor durante los próximos años. Para convertirse en un apoyo real a la generación de energía limpia, la técnica debería multiplicar su capacidad para crecer durante los próximos años. Sin embargo, no existe gran margen para reducir los altos costes de inversión iniciales y, por ende, tampoco el del precio por kilovatio hora. Solo la perforación comporta la mitad del coste, y no siempre se llega a rocas lo bastante calientes o a las esperadas aguas termales.

El informe de 2003 de la TAB ya identificó el principal obstáculo al que habría de enfrentarse una eventual ampliación del sector geotérmico: con un 18 por ciento, la eficiencia de la producción eléctrica de sus centrales resulta demasiado exigua. En su lugar, el calor podría distribuirse directamente a hogares y a la industria. Aunque el procedimiento resulta laborioso y caro, la mayoría de las compañías intentan tomar ese camino. En Unterhaching, por ejemplo, se invirtió en una extensa red de cale-



Los sistemas geotérmicos mejorados permiten obtener energía aun en ausencia de reservas de agua. A tal fin, la roca se fractura mediante la inyección de agua a altas presiones. Después, el líquido se calienta y se reconduce a la central mediante sistemas de bombeo.

facción. Sin embargo, dado que los costes asociados a una red tal superan a los de la central misma, un proyecto así solo dará resultado si se perfora en una zona con una alta densidad de población. Por otro lado, cabe también esperar una cierta demanda por parte de la industria, posibilidad que ha sido considerada por Nils Kock y Martin Kaltschmitt, del Instituto de Tecnología Ambiental y Economía Energética de la Universidad Técnica de Hamburg-Harburg. Según su propuesta, el calor geotérmico podría emplearse en el secado de alimentos, fangos o pastillas de madera para combustible. Tal vez mereciese la pena, si bien para ello las industrias beneficiarias deberían establecerse cerca de la fuente de calor.

Otros países ya han dado ese paso. En Islandia, el agua caliente doméstica procede de fuentes termales y, en invierno, los supermercados ofrecen tomates cultivados en invernaderos locales gracias al calor procedente del subsuelo. Y la isla volcánica aún goza de márgenes para ampliar su potencial. Algunas compañías están sopesando la posibilidad de usar almacenes térmicos que operen a temperaturas mucho más elevadas que hasta ahora. El Proyecto de Excavación Profunda, por ejemplo, intenta extraer agua subterránea a una temperatura de entre 400 y 600 grados Celsius. En tales condiciones, sin embargo, el agua se encuentra en estado supercrítico (ni líquido ni gaseoso), lo cual origina nuevos problemas.

En teoría, el agua en estado supercrítico podría incrementar la potencia de una central geotérmica hasta un valor equiparable al de las centrales de carbón modernas, ya que el agua que estas emplean se encuentra también en dicho estado. Sin embargo, en plena naturaleza las cosas se complican. Incluso la broca de perforación tendría que ser refrigerada a conciencia para resistir temperaturas tan elevadas en el interior de la roca. Además, las tuberías de transporte, de varios kilómetros de longitud, deberían aislarse a la perfección para que el agua no se enfriase demasiado. En 2009, un proyecto islandés estuvo a punto de lograrlo en el sistema volcánico de Krafla, al norte de la isla. Pero, a dos kilómetros de profundidad, la taladradora se desviaba o se atascaba. Cuando los ingenieros extrajeron la barra de perforación, hallaron en la broca restos de magma que había estado en contacto con la taladradora a unos mil grados Celsius: demasiado incluso para la técnica moderna.

ENTREVISTA



«La energía geotérmica suministra carga base»

Entrevista con Ladislaus Rybach, geofísico y profesor emérito de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich

Karl Urban

Usted ha sido uno de los precursores de la energía geotérmica desde sus inicios en los años setenta. Entonces, dos crisis del petróleo impulsaron a los Gobiernos de todo el mundo a pensar en fuentes de energía alternativas. ¿Cómo cree que ha evolucionado la geotermia en Europa central?

Ha transcurrido mucho tiempo hasta que el sector se ha puesto realmente en marcha. Entre otras causas, eso ha llegado tras las bonificaciones que el sector de las renovables —la geotermia entre ellas— ha recibido en Alemania y otros países. Estoy impresionado por los progresos logrados, por ejemplo, en los alrededores de Múnich. Sin embargo, queda por delante una segunda revolución, ya que no en todas partes existen reservas profundas de aguas termales. Otras regiones solo disponen de roca seca; la cual, no obstante, contiene grandes cantidades de calor que en ocasiones incluso se repone de manera continua desde las profundidades de la Tierra.

Hasta ahora ha habido pocos proyectos piloto y no todos han resultado exitosos. ¿Se han subestimado los problemas?

La existencia de aguas termales, e incluso la posibilidad de poderlas aprovechar, solo puede conocerse tras una perforación profunda y las subsiguientes pruebas de extracción. Eso provoca intentos fallidos. Hace poco presencié uno en Zúrich, donde, a pesar de una gran inversión inicial, la perforación no resultó lo suficientemente productiva. Desde la superficie no puede saberse a ciencia cierta cuál es la composición de la roca y cuánta agua existe a tres o cuatro kilómetros de profundidad.

Con todo, no pocos expertos ven con buenos ojos una ampliación de la energía geotérmica en los próximos años. ¿Por qué la geotermia se encuentra tan claramente a remolque de las otras renovables?

En Europa central, temperaturas tan elevadas solo aparecerían a profundidades muy superiores a los diez kilómetros. Ello elevaría el coste de las excavaciones a precios exorbitantes y, además, habría que evitar que el agua se enfriase en su camino hacia la superficie. No obstante, una posibilidad consistiría en inyectar otro tipo de líquido. Donald Brown, del Laboratorio Nacional de Los Álamos, ha propuesto emplear dióxido de carbono, ya que este compuesto pasa al estado supercrítico a la modesta temperatura de 31 grados Celsius y a presiones relativamente bajas. Además, si se utilizase el gas residual de una central de combustibles fósiles, la fracción de dióxido de carbono que se perdiese en el proceso acabaría enterrada para siempre. Hasta ahora, sin embargo, no se conoce bien la manera en que el agua y el dióxido de carbono reaccionan a grandes profundidades. Por otro lado, este último presenta una capacidad calorífica notablemente menor, por lo que una central geotérmica que



Instalación geotérmica en la región volcánica de Krafla, al norte de Islandia. El país cubre el 62 por ciento de sus necesidades energéticas gracias al calor procedente del subsuelo.

No siempre ha sido así. Al fin y al cabo, la geotermia existe desde hace más de cien años. En cuanto a la potencia instalada en todo el mundo, fue superada por la fotovoltaica solo en 2007. Incluso tres años después, la energía geotérmica suministraba un 40 por ciento más de electricidad a la red, debido a que el calor de la Tierra puede aprovecharse con mucha más constancia que la luz solar. Sin embargo, el crecimiento exponencial de la generación fotovoltaica ha llevado a la energía geotérmica a descolgarse por completo. En todo el planeta, la fotovoltaica crece hoy a un ritmo de un 40 por ciento anual; nosotros nos alegramos si llegamos a una ampliación del 5 por ciento al año.

¿Debería eso cambiar dentro de poco?

Si no logramos desarrollar intercambiadores de calor hechos a medida con las nuevas técnicas EGS (sistemas geotérmicos mejorados), las tasas de crecimiento permanecerán modestas. Las fuentes naturales resultan demasiado escasas. Con depósitos de agua artificiales, en cambio, podríamos aprovechar el calor del subsuelo en todas partes y suministrar calor y electricidad a barrios enteros.

En los intercambiadores de calor se inyecta agua a presión para generar fisuras en la roca. Como consecuencia, las primeras plantas piloto han provocado temblores perceptibles, si bien aislados. En 2006, un proyecto en Basilea fue cancelado a causa de las sacudidas sísmicas. ¿Cuál es su opinión al respecto?

En Basilea se cometió un error que, desde luego, ha tenido consecuencias importantes. Desde entonces en Alemania han surgido numerosas iniciativas ciudadanas, no solo en contra de las perforaciones geotérmicas, sino también frente al almacenamiento de dióxido de carbono en el subsuelo y contra la fracturación del terreno para extraer gas, que también puede causar sacudidas. En Suiza, en cambio, la energía geotérmica ha superado protestas semejantes como consecuencia de un tratamiento público correcto. En San Galo se celebró un referéndum en el que el 80 por ciento votó a favor de la energía geotérmica. Pero la gente muestra sus reservas, ya sea por falta de conocimiento o por miedo a lo desconocido. Esas reservas deben ser tomadas en serio.

¿Se siente capaz de liberar a la población del miedo a las temblores sísmicos?

El miedo solo se superará si somos capaces de construir instalaciones que funcionen sin problemas. Yo mismo he podido experimentar lo que ocurre cuando la gente visita una central, tocan las tuberías y comprueban que están calientes. Albergo grandes esperanzas debido a los avances que se están consiguiendo en algunos países. En EE.UU. existen varios proyectos en los que se están construyendo intercambiadores de calor; también en Australia está desarrollándose una actividad considerable. Parece que allí los ingenieros prestan gran atención a la posibilidad de que se produzcan terremotos y, en caso afirmativo, a la manera en que eso sucede. Desde un punto de vista técnico, solo las sacudidas imperceptibles resultan deseables: son ellas las que generan el sistema de fisuras distribuidas que necesitamos para los intercambiadores de calor. Los movimientos sísmicos de mayor magnitud abren grietas demasiado grandes. En la actualidad, un gran número de investigadores, tanto en nuestro instituto en Zúrich como en otros centros, trabaja para resolver ese problema: ¿cómo generar exclusivamente grietas menores sin provocar temblores?

Si en ciertos lugares la energía geotérmica continuara topándose con una oposición social: ¿cabría prescindir de ella, a la vista de que presenta una tasa de crecimiento más bien baja?

Todo país que se decida por reducir el uso de la energía nuclear necesita con urgencia todas las alternativas disponibles. Eso no quiere decir que debamos centrarnos de manera exclusiva en la geotermia, pero esta debe formar parte de la mezcla energética del futuro. Al contrario que la solar o eólica, sus centrales proporcionan carga base a la red.

USO DOMÉSTICO

Geotermia en el jardín

Ya a una docena de metros bajo la superficie, la temperatura asciende a unos diez grados Celsius tanto en verano como en invierno. Con ayuda de una bomba de calor, ello basta para calentar hogares durante la estación fría, lo cual supone más de la mitad del consumo doméstico de energía eléctrica en un país como Alemania. El mercado para la climatización geotérmica de superficie ha crecido en los últimos años en dos órdenes de magnitud: Suecia ya extrae de esa manera más calor del suelo que Islandia y en Alemania se han perforado más de 265.000 pozos. Una quinta parte de todas las viviendas de nueva construcción del país emplea esta técnica.

La generación geotérmica de superficie se basa, en realidad, en un aprovechamiento de la energía solar. Entre los 50 y los 250 metros de profundidad, el subsuelo almacena energía procedente de la radiación solar, así como agua de lluvia templada. Un pozo típico, con un diámetro de 15 centímetros, puede excavarse en pocas horas. En él se introducen dos tubos de plástico y, tras ser rellenado con cemento, ya disponemos de un circuito cerrado para extraer calor desde el subsuelo hasta el sótano de calefacción, donde una bomba de calor se hará cargo del resto. El dispositivo funciona como una nevera, pero con el ciclo termodinámico invertido. Aunque la bomba requiere un gasto de electricidad, más del 80 por ciento de la energía usada para calentar la vivienda con este método procede del subsuelo.

El potencial de la técnica reside en su universalidad, ya que son muy pocas las zonas en las que, debido a las características especiales del agua subterránea, no está permitida la geotermia de superficie. En algunos casos, no obstante, también las excavaciones de poca profundidad resultan imprevisibles. En el ayuntamiento de la localidad alemana de Staufen se perforó un campo con siete sondas para el sistema de calefacción. Pero una de ellas conectó una capa de agua subterránea con otra rica en anhidrita, por lo que esta última acabó convertida en yeso. En el proceso, su volumen aumentó un 60 por ciento, lo cual elevó más de 30 centímetros una parte del casco antiguo de la idílica ciudad y dañó numerosos edificios.

La energía geotérmica de superficie también puede explotarse en áreas metropolitanas. En Fráncfort, por ejemplo, varias sondas de calor se emplean para refrescar los edificios durante el verano. A tal fin, se invierte el ciclo termodinámico de las bombas y se deriva energía térmica desde las construcciones hasta el subsuelo. Como resultado, la roca subterránea de la ciudad puede alcanzar los 20 grados Celsius durante la época estival. Parte de ese calor se mantiene durante el tiempo suficiente para poder aprovecharlo durante el invierno. El método permitiría aprovechar otras fuentes de calor subterráneo de las grandes ciudades. Según un estudio reciente sobre las posibilidades de dicha técnica en la ciudad de Colonia, toda la urbe podría calentarse a partir del calor residual que ella misma acumula en el subsuelo.

emplease dióxido de carbono probablemente suministraría una potencia poco mayor que una instalación de agua.

¿VOLCANES MARINOS?

En un futuro quizá veamos materializarse la idea del equipo de Gerardo Hiriart, de la Universidad Nacional Autónoma de México: explotar fisuras volcánicas en el Pacífico. A lo largo de las dorsales oceánicas brota con fuerza vapor caliente a alta presión; en algunos lugares, incluso en un estado supercrítico. Los investigadores proponen colocar sobre las «fumarolas negras» —así llamadas por el color de sus exhalaciones— plataformas marinas adecuadas para generar la electricidad. Pero, aunque la idea funcionase, solo podrían beneficiarse de ella los países que, al igual que México, cuentan con acceso a volcanes marinos cercanos a la costa.

A escala mundial, el mayor potencial reside en las zonas que poseen roca caliente a varios kilómetros bajo la superficie. Si hemos de apostar por un modelo energético basado en la generación con fuentes renovables, sería urgente y necesario avanzar en esa dirección. La razón se debe a que, al contrario de la energía eólica o fotovoltaica, que sufren grandes oscilaciones en el suministro, las centrales geotérmicas operan en la actualidad el 75 por ciento del año, con una tendencia al alza.

La geotermia es la más constante de todas las fuentes renovables, aunque aprovechar esa ventaja requerirá aumentar el número de instalaciones. Al menos de momento, parece observarse ese comportamiento: un informe reciente del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) pronosticaba, a partir de los proyectos en curso en un gran número de países, que la potencia geotérmica instalada en todo el mundo crecería en los próximos tres años el doble que durante las tres últimas décadas. A medio plazo, la experiencia conseguida podría bastar para sacar un mayor partido de la técnica EGS. Con ello podría cubrirse hasta el 3 y el 5 por ciento de la demanda eléctrica global para 2050.

Pese a todo, las cifras evidencian que, lejos de las zonas volcánicas, la energía geotérmica continuará constituyendo una opción marginal en la generación de electricidad. También los pronósticos de ampliación distan de ser tan certeros como los relativos a otras fuentes renovables. Hasta ahora, cada perforación de varios kilómetros de profundidad se ha encontrado con particularidades geológicas contra las que ingenieros y geólogos han tenido que luchar. Incluso las calderas hirvientes de de Krýsusík han llegado a provocar sorpresas: hasta 1999, una pequeña central suministraba calefacción a dos poblaciones cercanas. Un día, una explosión de vapor destrozó sin previo aviso el pozo. Desde entonces, las autoridades apostaron por el turismo y levantaron una pasarela de madera y unos aseos públicos. Tras una segunda explosión, solo sobrevivió la pasarela y la señal con la advertencia: «Atención: Zona geotérmica. Peligro de explosión».

PARA SABER MÁS

A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO_2 instead of water. D. Brown en *Proceedings Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, 2000.

Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Büro für Technikfolgenabschätzung im Deutschen Bundestag, 2003.

100 years of geothermal power production. J. Lund en *Geo-Heat Center Bulletin*, 2004.

Submarine geothermics: Hydrothermal vents and electricity generation. G. Hiriart et al. en *Proceedings World Geothermal Congress*. Bali, 2010.

Intergovernmental Panel on Climate Change: Renewable energy sources and climate change mitigation. O. Edenhofer et al., 2012. Disponible en **srren.ipcc-wg3.de**

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

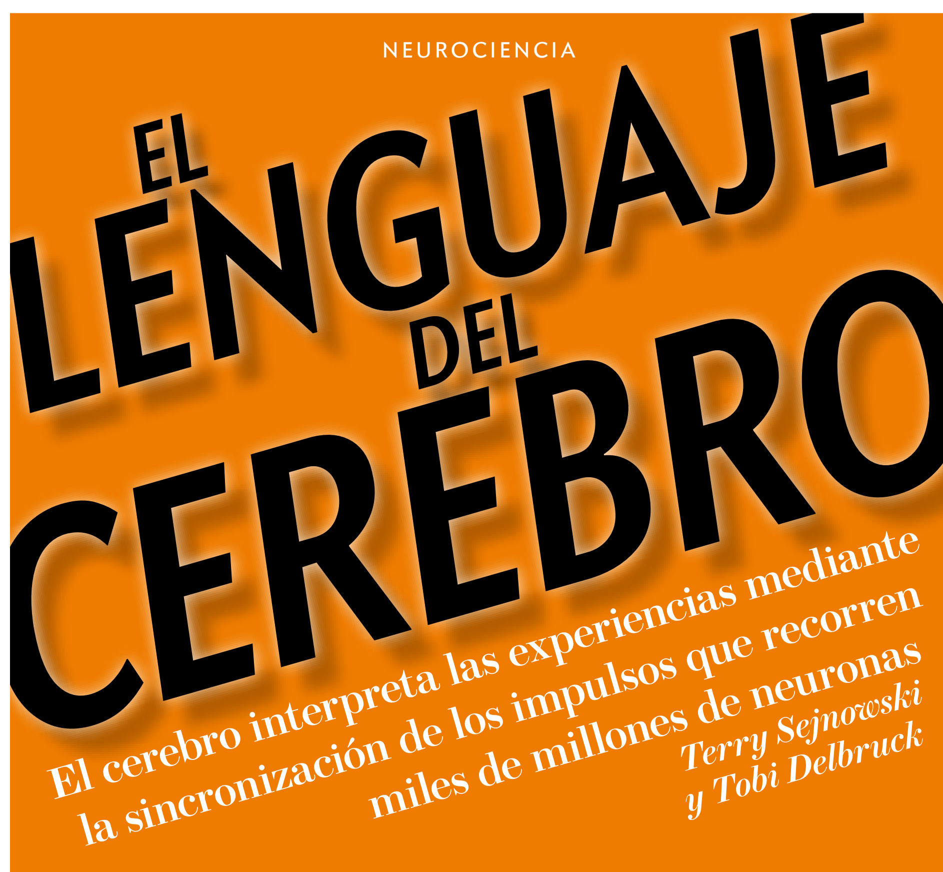
Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.



Terry Sejnowski es investigador en el Instituto Médico Howard Hughes y profesor Francis Crick en el Instituto Salk de Estudios Biológicos, donde dirige el Laboratorio de Neurobiología Computacional.



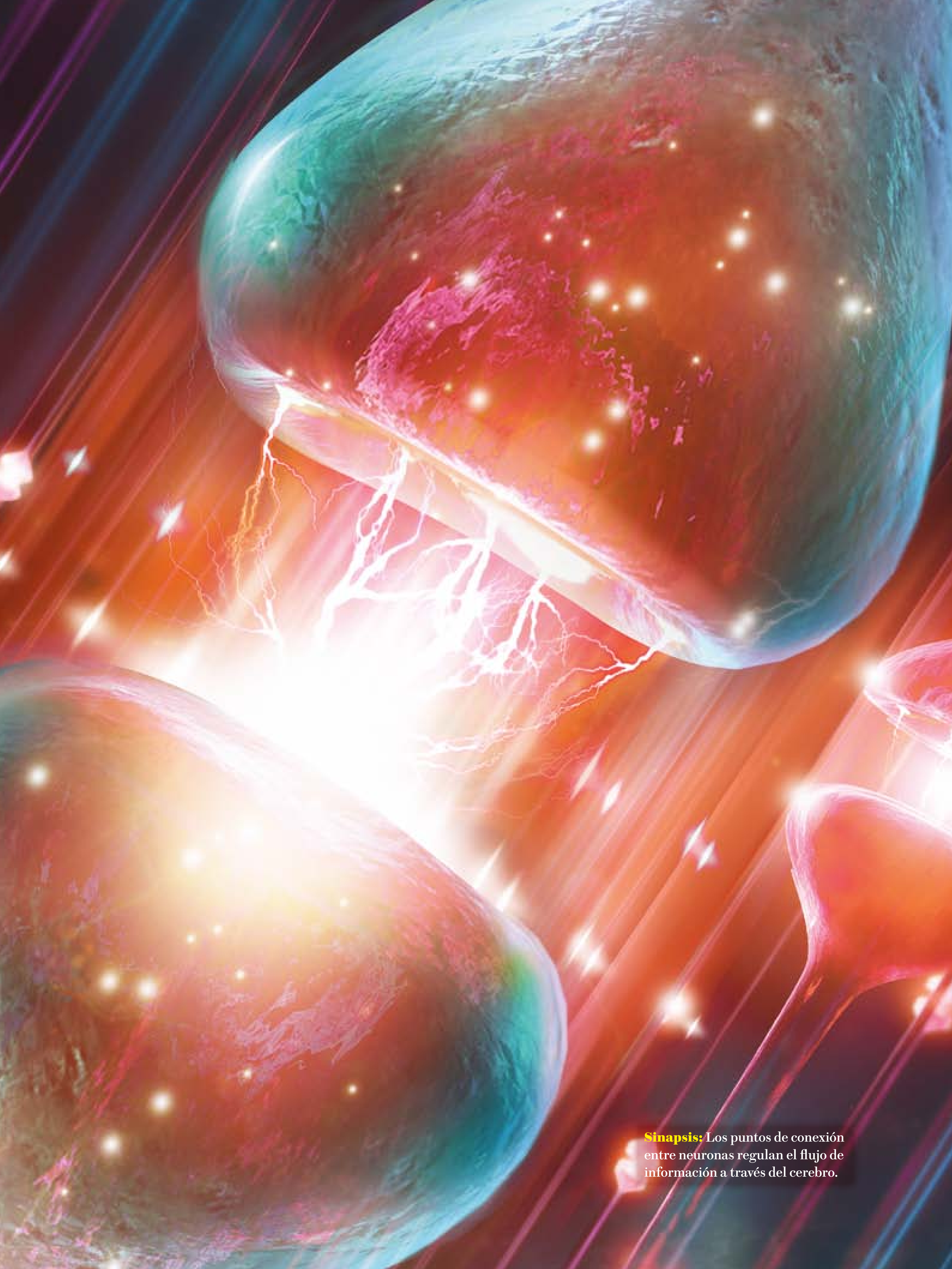
Tobi Delbruck es uno de los jefes del grupo de sensores en el Instituto de Neuroinformática de la Universidad de Zúrich.



NUESTRO CEREBRO FUNCIONA MEJOR QUE GOOGLE O QUE EL ROBOT MÁS MODERNO.

De entre la vasta gama de experiencias y emociones que almacenamos, en un instante accedemos a una de ellas. Reconocemos de inmediato la cara de nuestros padres, cónyuge, amigos o mascotas, ya sea a plena luz, en la oscuridad, desde arriba o de reojo, una tarea que los sistemas de visión por ordenador de los robots más sofisticados logran a duras penas. También realizamos sin esfuerzo varias operaciones a la vez, como cuando sacamos un pañuelo de nuestro bolsillo y nos secamos la frente mientras entablamos una conversación con un conocido. Sin embargo, la creación de un cerebro electrónico que permita a un robot llevar a cabo esta simple combinación de comportamientos queda todavía lejos.

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS



Sinapsis: Los puntos de conexión entre neuronas regulan el flujo de información a través del cerebro.

¿Cómo ejecuta el cerebro todas esas acciones, teniendo en cuenta que la complejidad de redes en su interior (billones de conexiones entre miles de millones células) rivaliza con la de Internet? Una de las respuestas la hallamos en su gran eficiencia energética: cuando una neurona se comunica con otra, gasta una millonésima parte de la energía que necesita un ordenador para realizar una operación equivalente. Sin duda, la evolución debió favorecer en este órgano de algo más de 1 kilogramo un rendimiento cada vez mayor.

Sin embargo, el ahorro energético no puede ser la única explicación, dado que el cerebro cuenta con una serie de limitaciones intrínsecas. Una neurona de la corteza cerebral, por ejemplo, responde a un estímulo de otra neurona que inicia un impulso, o potencial de acción, en milésimas de segundo. Lo hace a paso de tortuga, en comparación con los nanosegundos que tardan los transistores en encender un ordenador. La fiabilidad de una red neuronal también es baja: una señal que viaja de una célula cortical a otra llega a su destino final con una probabilidad del 20 por ciento, valor que se reduce aún más si la conexión entre ambas es distante y no directa.

No se comprende del todo la manera en que el cerebro extrae una información coherente de las señales que pasan por él. Sin embargo, los autores del presente artículo y otros investigadores hemos realizado progresos muy interesantes, al concentrarnos en el modo en que el cerebro emplea la coordinación temporal de los potenciales de acción para codificar la información y resolver con rapidez problemas computacionales complicados. Ello se debe a que un grupo de impulsos iniciados al mismo tiempo pueden transmitir mucha más información que un grupo de impulsos semejantes pero no sincronizados.

Aparte de entender una de las máquinas más complejas que se conocen en el universo, los resultados de estos estudios podrían llevar al desarrollo de ordenadores totalmente nuevos. Ya se han construido circuitos electrónicos «neuromórficos» que imitan algunas características de las redes de señalización cerebrales. Hoy en día, podemos crear aparatos con un millón de neuronas electrónicas y se planea construir sistemas aún mayores. A la larga, será posible diseñar ordenadores neuromórficos que funcionen mucho más rápido que los actuales y que requieran tan solo una fracción de su potencia [*véase* «Retinas artificiales», por Kwabena Boahen; Investigación y Ciencia, julio de 2005].

PARLOTEO NEURONAL

Como otros neurocientíficos, estamos usando el sistema visual como banco de pruebas, en parte porque se conoce bien el diagrama básico de sus conexiones. Durante mucho tiempo se ha sospechado que la coordinación temporal de las señales emitidas en cualquier región del cerebro constituye una parte fundamental del código que el órgano utiliza para decidir si la información que pasa a través de él es relevante o no. Pero durante décadas esas ideas se dejaron de lado porque la coordinación solo es importante cuando se comparan diferentes partes del cerebro y resultaba difícil medir la actividad de más de una neurona a la vez. Sin embargo, el desarrollo reciente de modelos computacionales del sistema nervioso y los nuevos resultados experimentales y teóricos han suscitado interés en la coordinación temporal como un medio para entender mejor el modo en que las neuronas se comunican entre sí.

Las células cerebrales reciben todo tipo de estímulos a diferentes escalas de tiempo. La rápida señal (del orden de microsegundos) desde el oído derecho debe reconciliarse con el estímulo ligeramente retrasado o adelantado del izquierdo. Estas respuestas rápidas contrastan con la lenta corriente de hormonas que circula por el torrente sanguíneo. Pero las señales en las que deseamos hacer hincapié son los potenciales de acción, los bruscos aumentos de voltaje que pasan por y entre las neuronas. Para la comunicación entre dos células, los potenciales de acción que duran algunos milisegundos se hacen cargo de las necesidades inmediatas. Una neurona inicia un potencial de acción tras decidir si el número de estímulos que la empujan a activarse superan a aquellos que la mantienen en reposo. Cuando la decisión está tomada, el impulso recorre el axón de la célula (semejante a un cable eléctrico ramificado) hasta sus extremos. Allí la señal se transmite químicamente a través de las zonas de enlace, las sinapsis, que unen el axón con la neurona receptora.

En cada ojo, 100 millones de fotorreceptores de la retina responden a patrones de luz cambiantes. Después de que la luz es procesada por varias capas de neuronas, un millón de células ganglionares en la parte posterior de la retina convierten esas señales en una secuencia de potenciales de acción que se transmiten a través de los axones hacia otras partes del cerebro. Estas, a su vez, mandan impulsos a otras regiones que finalmente dan lugar a la percepción consciente. Cada axón puede transmitir hasta varios cientos de impulsos por segundo, aunque la mayoría de las veces solo algunos atraviesan el cableado neuronal. Todo lo que percibimos del mundo visual está codificado en esos ríos de impulsos eléctricos separados por diferentes intervalos de tiempo.

Monitorizar la actividad individual de múltiples neuronas a la vez resulta fundamental para entender lo que está sucediendo en el cerebro, pero esa labor ha entrañado durante tiempo enormes dificultades. Sin embargo, en 2012, E. J. Chichilnisky, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla (California), y sus colaboradores publicaron en *Nature* que habían conseguido registrar simultáneamente los potenciales de acción de cientos de neuronas ganglionares vecinas en retinas de mono. Ese logro permitió identificar los fotorreceptores específicos conectados con cada célula ganglionar. La creciente habilidad para registrar en paralelo los impulsos de un gran número de neuronas ayudará a descifrar el significado de las señales neuronales.

Durante años se han usado diferentes métodos para interpretar, o descodificar, el significado de la corriente de impulsos que llegan desde la retina. En uno de los métodos se cuentan durante cierto tiempo los potenciales de acción de cada axón por separado: cuanto más frecuentes son estos, más fuerte es la señal. La información sobre las distintas frecuencias de las des-

EN SÍNTESIS

Con poco más de un kilogramo de peso, el cerebro es capaz de percibir, pensar y actuar con una precisión imposible de conseguir por un ordenador.

Esa proeza cognitiva se logra mediante la sincronización de las señales que atraviesan los billones de conexiones entre los miles de millones de neuronas.

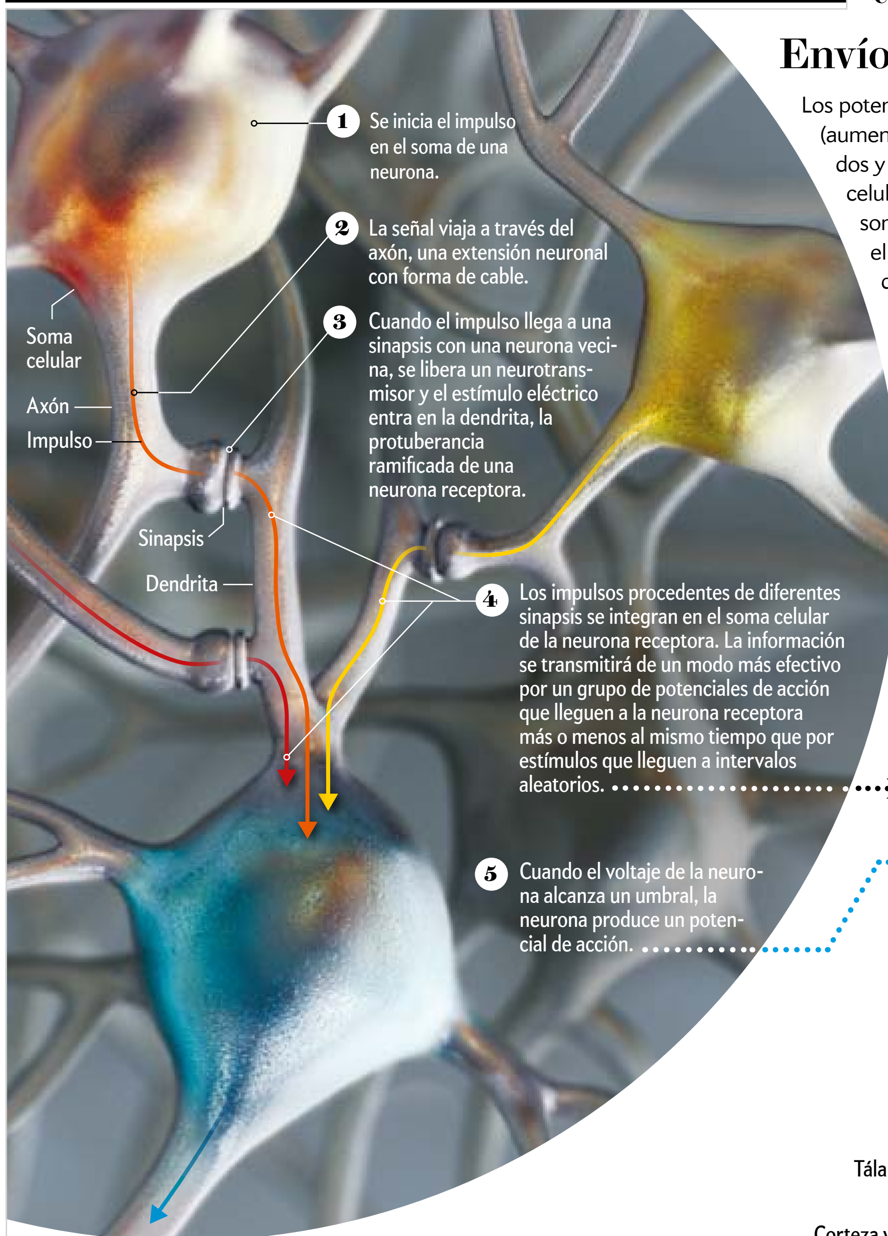
Cuando vemos una maceta, varios grupos de neuronas se activan durante un breve intervalo de tiempo para estimular una parte del cerebro, la cual representa el objeto en ese justo momento.

Entender el funcionamiento de esa sincronización nos ayudará a comprender nuestro comportamiento y a construir nuevos ordenadores, más eficaces que las máquinas digitales tradicionales.

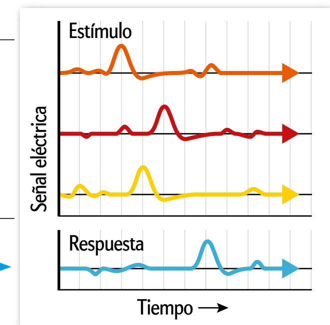
COMUNICACIÓN EFICIENTE

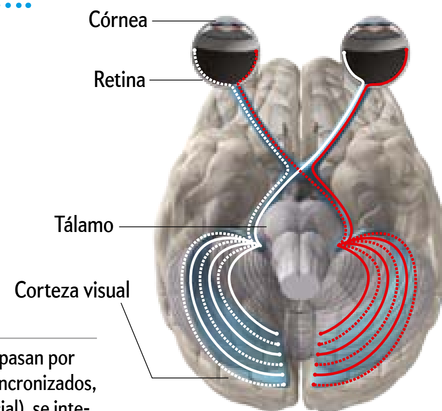
Envío rápido de mensajes

Los potenciales de acción o impulsos eléctricos (aumentos de voltaje que ocurren en milisegundos y que recorren los axones desde los somas celulares y se transmiten a otras neuronas) son las señales de comunicación usadas por el cerebro para dar una respuesta inmediata a un estímulo. Investigaciones recientes han demostrado que la sincronización de esos impulsos aporta eficiencia a una red cerebral formada por billones de conexiones entre neuronas.



Los impulsos que llegan a una neurona en una estrecha ventana temporal de milisegundos, ilustrados abajo como picos en las curvas de colores, provocan la activación de esa neurona.





Desde los ojos hasta el cerebro

La visión se produce cuando los impulsos generados por las células del ojo en respuesta a un objeto pasan por la estación intermedia del tálamo y llegan por último a la corteza visual. Los potenciales de acción sincronizados, cada uno de los cuales representa una característica del objeto (como el color o la orientación espacial), se integran en la corteza para dar lugar a la percepción del objeto completo.

EMILY COOPER

cargas, recogida en un código de frecuencia, incluye algunas características de las imágenes visuales, como la ubicación en el espacio, las regiones con distintos contrastes y las zonas en las que hay movimiento. Cada uno de esos rasgos se halla representado por un grupo de neuronas distinto.

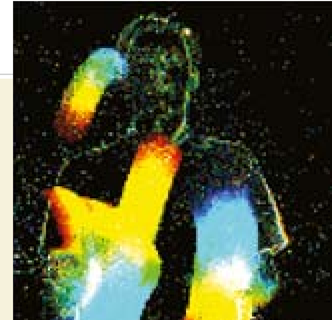
La información también se transmite mediante el tiempo relativo, lo que sucede cuando la activación de una neurona guarda una estrecha relación con la activación de otra. Las células ganglionares de la retina, por ejemplo, muestran una enorme sensibilidad a la intensidad de luz y responden a escenas visuales cambiantes mediante la transmisión de potenciales de acción a otras partes del cerebro. Cuando múltiples células ganglionares inician un impulso casi al instante, el cerebro sospecha que están respondiendo a cierto aspecto de un objeto. Horace Barlow, de la Universidad de Cambridge, caracterizó el fenómeno como un conjunto de «coincidencias sospechosas». Había observado que cada célula de la corteza visual podía ser activada por un rasgo de un objeto (como el color o la orientación). La activación simultánea de varias de esas células constituye una coincidencia sospechosa porque solo puede ocurrir en un momento preciso para un objeto específico. Parece que el cerebro interpreta esa sincronía como una señal relevante, porque tal coordinación tiene una probabilidad muy baja de suceder al azar.

APLICACIONES

Una cámara inspirada en la retina

El invento nace del estudio de la velocidad y eficiencia del procesamiento visual en el cerebro





Registrar lo que se mueve: La DVS captura solo partes de la escena donde los píxeles cambian de luminosidad de un momento al siguiente. Al variar el contraste en la imagen del niño (*izquierda*), los píxeles se aclaran o se oscurecen. En la del malabarista (*derecha*), los movimientos recientes brillan en rojo y los antiguos en azul.

Las cámaras de vídeo digitales tradicionales funcionan con una sorprendente ineficacia. Capturan 24 fotogramas por segundo para recoger las intensidades de luz cambiantes que componen las partes de una escena visual. Cada píxel registra la intensidad media durante 40 milisegundos, el tiempo que tarda una pelota de tenis en recorrer 1,5 metros tras ser golpeada. Como resultado, las cámaras producen un enorme flujo de datos que consume mucho tiempo de procesamiento.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia, uno de los autores (Delbruck) y sus colaboradores han desarrollado un nuevo tipo de cámara que imita el modo en que ciertas partes de la retina codifican las imágenes en nuestro cerebro. Igual que la retina, la cámara, denominada sensor de visión dinámica (DVS, por sus siglas en inglés), percibe solo las partes de la escena que cambian cuando cualquier píxel detecta una variación en la luminosidad con respecto al valor registrado. Con un flujo mínimo de datos, captura incluso los objetos que se mueven muy deprisa.

Los píxeles en la DVS se comportan como algunas células ganglionares de la retina que inician un impulso eléctrico cuando la luminosidad varía. La cámara es capaz de registrar un cambio de intensidad luminosa en un microsegundo, con lo que puede seguir un movimiento de alta velocidad mejor que las cámaras ordinarias, que capturan una escena fotograma a fotograma a una velocidad de milisegundos.

Debido a que la DVS genera escasos datos, aunque concentrados, constituye un excelente centinela o detector de cualquier movimiento, ya sea de un coche, un peatón o un anciano que se resbala y cae. Por su alta velocidad, la DVS se ha incorporado en un robot que para balones en una portería, otro mantiene un lapicero en equilibrio, un coche que sigue una línea dibujada con tiza y sensores que siguen las partículas en movimiento de un fluido o que interpretan gestos humanos. La estrategia de «registrar lo que cambia» en el procesamiento de la información visual está atrayendo el interés de los diseñadores de tecnología. Un grupo de la Escuela de Medicina Weil Cornell y sus colaboradores han desarrollado una prótesis de retina artificial que procesa la luz mediante este método, un guiño a la elegancia discreta con la que en ocasiones funciona la biología.

Los ingenieros electrónicos intentan utilizar ese conocimiento para crear equipos aún más eficientes que incorporen los principios de la coordinación de los impulsos al registrar escenas visuales. Uno de los autores (Delbruck) ha construido una cámara que emite potenciales de acción en respuesta a los cambios en la luminosidad de una escena, lo que permite seguir objetos que se mueven muy deprisa con un procesamiento mínimo por parte del equipo que captura las imágenes.

HACIA LA CORTEZA CEREBRAL

Los nuevos datos refuerzan la idea de que la corteza visual presta atención a claves temporales para interpretar lo que ven los ojos. Las células ganglionares de la retina no establecen una sinapsis directa con la corteza, sino que transmiten la información a través de neuronas del tálamo, una estructura profunda de la sección media del cerebro. Esta región debe activar, a su vez, 100 millones de células en la corteza visual de cada hemisferio, en la parte posterior del cerebro, antes de que se envíen los mensajes a áreas cerebrales superiores para la interpretación consciente.

Para identificar qué secuencias de potenciales de acción resultan más efectivas en la activación de células de la corteza visual, pueden examinarse las conexiones de las interneuronas del tálamo con las neuronas estrelladas de una capa intermedia de la corteza visual. En 1994, Kevan Martin, en la actualidad en el Instituto de Neuroinformática de la Universidad de Zúrich, y sus colaboradores reconstruyeron las entradas sinápticas desde el tálamo hasta la corteza cerebral y descubrieron que solo constituían el 6 por ciento de las sinapsis de todas las células estrelladas. Todos se preguntaban cómo ese débil estímulo visual podía transmitirse con fiabilidad a las neuronas de las distintas capas de la corteza.

Las neuronas corticales son extremadamente sensibles a los estímulos que fluctúan, ante los que responden en tan solo unos milisegundos. En 2010, uno de los autores (Sejnowski), junto con Hsi-Ping Wang y Donald Spencer, del Instituto Salk, y Jean Marc Fellous, de la Universidad de Arizona, desarrollaron un detallado modelo informático de una célula estrellada. Demostraron que, si bien una de esas células no se activa cuando le llega un solo potencial de acción de un único axón, sí lo hace cuando recibe impulsos de cuatro axones procedentes del tálamo y los impulsos llegan con pocos milisegundos de diferencia. Una vez alcanzadas por los estímulos de tálamo, tan solo una pequeña parte de las neuronas de la corteza visual necesitan activarse para representar el contorno y la textura de un objeto. Cada neurona estrellada se activa con una alta frecuencia en respuesta a un estímulo visual preferido proveniente del ojo, como el borde de un objeto con un ángulo particular de orientación.

En los años sesenta, David Hubel, de la Escuela de Medicina de Harvard, y Torsten Wiesel, ahora en la Universidad Rockefeller, descubrieron que cada neurona de una región determinada de la corteza respondía a su estímulo preferido solo si la activación procedía de una parte del campo visual, el campo receptivo de la neurona. Las células que responden a la estimulación en la fóvea (la región central de la retina) poseen los campos receptivos más pequeños, de un tamaño similar a una letra de esta página. En los años ochenta, John Allman, del Instituto Tecnológico de California, demostró que la respuesta de una neu-

CORTESÍA DE TOBI DELBRUCK (*niño*); CORTESÍA DE PATRICK LICHTSTEINER Y TOBI DELBRUCK (*malabarista*)

rona a los estímulos en su campo receptivo puede verse alterada por la estimulación visual fuera de este, lo que significa que reacciona ante las señales en un contexto visual más amplio.

La estimulación de la región que rodea el campo receptivo de una neurona también ejerce un efecto espectacular en la coordinación temporal de los potenciales de acción. David McCormick, James Mazer y sus colaboradores, de la Universidad Yale, han registrado hace poco la respuesta de distintas neuronas de la corteza visual del gato ante una película que se le muestra repetidas veces. Cuando estrechaban la imagen de la película, de modo que solo se estimulaba el campo receptivo de las neuronas, el desarrollo temporal de las señales presentaba un patrón aleatorio e impreciso. Cuando extendían la película para incluir el área adyacente fuera del campo receptivo, la frecuencia de activación de cada neurona disminuía, pero las descargas se sincronizaban con precisión.

La sincronización de los potenciales de acción también resulta importante en otros procesos neurales. Cada impulso representa un aspecto de un objeto (color u orientación) y su coordinación funciona como un método de ensamblaje de la imagen a partir de las partes que la componen. El potencial de acción para el «rojo rosado» se produce en sincronía con el del «contorno redondo», lo que permite a la corteza visual fusionar las señales en la imagen reconocible de una maceta.

ATENCIÓN Y MEMORIA

Hasta aquí hemos analizado el procesamiento visual desde los fotorreceptores hasta la corteza. Pero la percepción de una escena necesita algo más. La actividad de las neuronas corticales que reciben los estímulos visuales no solo se ve influida por estos, sino también por las interacciones excitadoras e inhibidoras entre esas células. Para coordinar su acción resulta de especial importancia la activación espontánea y rítmica a frecuencias por debajo de 100 hercios de numerosas neuronas corticales muy separadas entre sí.

La atención, un aspecto fundamental de la cognición, puede tener también sus bases físicas en las secuencias de potenciales de acción. Parece que su sincronización destaca la relevancia de una percepción o recuerdo particular de entre los que atraviesan el pensamiento consciente. Robert Desimon, ahora en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y sus colaboradores han demostrado que cuando los monos prestan atención a un estímulo determinado, aumenta el número de neuronas corticales que inician impulsos sincronizados en la banda gamma de frecuencias (de 30 a 80 hercios), así como el ritmo al que los emiten. Pascal Fries, del Instituto Ernst Strüngmann de Neurociencia, en colaboración con la Sociedad Max Planck de Fráncfort, descubrió que existía señalización de banda gamma entre áreas corticales distantes.

La activación neural en las frecuencias de la banda gamma ha atraído también la atención de otros investigadores, quienes han observado que los registros encefalográficos de pacientes con esquizofrenia y autismo presentan niveles bajos de ese tipo de señales. David Lewis, de la Universidad de Pittsburg, y Margarita Behrens, del Instituto Salk, entre otros, han localizado este déficit en cierto tipo de neuronas corticales, las células en cesto, que intervienen en la sincronización de impulsos en circuitos cercanos. Un desequilibrio en la inhibición o en la excitación de esas células parece reducir la actividad sincronizada en la banda gamma, lo que explicaría algunas de las bases fisiológicas de estos trastornos neurológicos.

Cuando se trata de asentar un recuerdo, el tiempo relativo entre los potenciales de acción parece ser tan importante como la frecuencia de las descargas. En concreto, el inicio sincronizado de los impulsos en la corteza ejerce un efecto notable en el refuerzo de las sinapsis, un proceso fundamental en la formación de la memoria a largo plazo. Se dice que una sinapsis ha sido reforzada cuando la activación de una neurona a un lado de la sinapsis provoca en la del otro lado una respuesta más fuerte. En 1997, Henry Markram y Bert Sakmann, entonces en el Instituto Max Planck de Investigaciones Médicas de Heidelberg, descubrieron un proceso conocido como plasticidad dependiente de la sincronización de los impulsos (*spike-timing-dependent plasticity*). Se produce cuando un estímulo sináptico emitido a una frecuencia en el rango gamma es sistemáticamente seguido, en los 10 milisegundos posteriores, por otro potencial de acción iniciado por la neurona situada al otro lado de la sinapsis. Este patrón refuerza la activación de la neurona que recibe el estímulo. A la inversa, si la segunda neurona se activa durante los 10 milisegundos anteriores a la activación de la primera, la fuerza de la sinapsis entre ambas células disminuye.

Algunas de las demostraciones más claras de la importancia de la sincronización de los potenciales de acción en la memoria han sido realizadas por György Buzsáki, de la Universidad de Nueva York, y otros investigadores en estudios sobre el hipocampo (área cerebral que interviene en el recuerdo de objetos y acontecimientos). La activación de las neuronas del hipocampo y de las áreas corticales con las que interacciona está muy influida por las oscilaciones cerebrales sincronizadas en un rango de frecuencias de entre cuatro y ocho hercios (banda theta). Este tipo de actividad neural se ha observado, por ejemplo, cuando una rata explora su jaula en un experimento de laboratorio. Las oscilaciones de frecuencia theta pueden coordinar el inicio de los impulsos y ejercer un efecto permanente en las sinapsis, lo que da lugar a cambios a largo plazo en la activación de las neuronas.

UN GRAN RETO POR DELANTE

La neurociencia se encuentra en un punto de inflexión, ahora que los nuevos métodos para registrar de modo simultáneo los potenciales de acción de miles de neuronas revelan patrones clave en la organización temporal de los impulsos y generan enormes bases de datos de interés científico. Por otro lado, la optogenética (una técnica para activar mediante señales luminosas neuronas genéticamente modificadas) permite excitar o silenciar de forma selectiva células de la corteza, paso indispensable para averiguar el modo en que las señales neurales controlan el comportamiento [*véase* «Control del cerebro por medio de la luz», por Karl Deisseroth; Investigación y Ciencia, enero de 2011]. Estas y otras técnicas nos ayudarán a indagar en las neuronas y aprender más y más acerca del código secreto que utiliza el cerebro para comunicarse consigo mismo. Cuando hayamos descifrado el código, no solo comprenderemos el sistema de comunicación neural, sino que también comenzaremos a construir máquinas que imiten la eficiencia de este extraordinario órgano.

PARA SABER MÁS

Clases Wolfgang Pauli impartidas en 2008 por Terry Sejnowski sobre el modo de computación y comunicación de las neuronas: **www.podcast.ethz.ch/podcast/episodes/?id=607**

Neuromorphic sensory systems. Shih-Chii Liu y Tobi Delbruck en *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 20, n.o 3, págs. 288-295, junio de 2010. **tinyurl.com/bot7ag8**

Cuando las neuronas sincronizan sus relojes. Raúl Vicente y Claudio R. Mirasso en *Mente y Cerebro* n.o 53, 2012.

John Ellis es profesor de física teórica en el King's College de Londres e investigador en el CERN.



ALTAS ENERGÍAS

¿Esconde el bosón de Higgs nueva física?

Hace unos meses el CERN anunció el hallazgo de una nueva partícula subatómica. Los físicos deberán ahora verificar si se trata del bosón de Higgs y resolver las numerosas cuestiones asociadas a su existencia

John Ellis

El descubrimiento en el CERN el pasado mes de julio de una partícula cuyas propiedades parecen concordar con las del largamente buscado bosón de Higgs ha supuesto un gran paso para la física de altas energías. Ahora bien, ¿se trata del mismo bosón de Higgs cuya existencia fue postulada en los años sesenta? Para responder a esta pregunta, los físicos deberán determinar con precisión todos los atributos de la nueva partícula. Si efectivamente se corresponde con el bosón de Higgs, el hallazgo habrá rubricado el éxito absoluto del modelo estándar de la física de partículas. Sin embargo, no será un punto final. El descubrimiento plantea varias cuestiones teóricas que trascienden el marco del modelo estándar y que invitan a considerar una teoría más profunda.

El modelo estándar explica toda la materia ordinaria del universo a partir de unas pocas partículas elementales: en concreto, tres clases de fermiones (partículas cuyo espín, o momento angular intrínseco, viene dado en unidades atómicas por un número semientero). Estos son los quarks, que a su vez se agregan para formar protones y neutrones; el electrón y sus dos versiones más pesadas, el muon y la partícula tau; y tres tipos de neutrinos. Dejando a un lado la gravedad, no descrita por el modelo estándar, los fermiones mencionados interaccionan unos con otros por medio de tres fuerzas fundamentales: la interacción electromagnética, que afecta a toda partícula dotada de carga eléctrica; la interacción nuclear fuerte, que mantiene cohesionado el núcleo atómico, y la interacción nuclear débil, responsable de la desintegración de algunos núcleos radiactivos. Las ecuaciones más simples del modelo estándar no hacen una distinción real entre las diferentes partículas de materia, lo que sugiere que todas ellas deberían ser de masa nula. Sin embargo, es un hecho que todas ellas poseen masa. No se trata de un detalle baladí: si la masa de los electrones fuese exactamente cero, los átomos no podrían formarse, ya que aquellos escaparían a la velocidad de la luz.

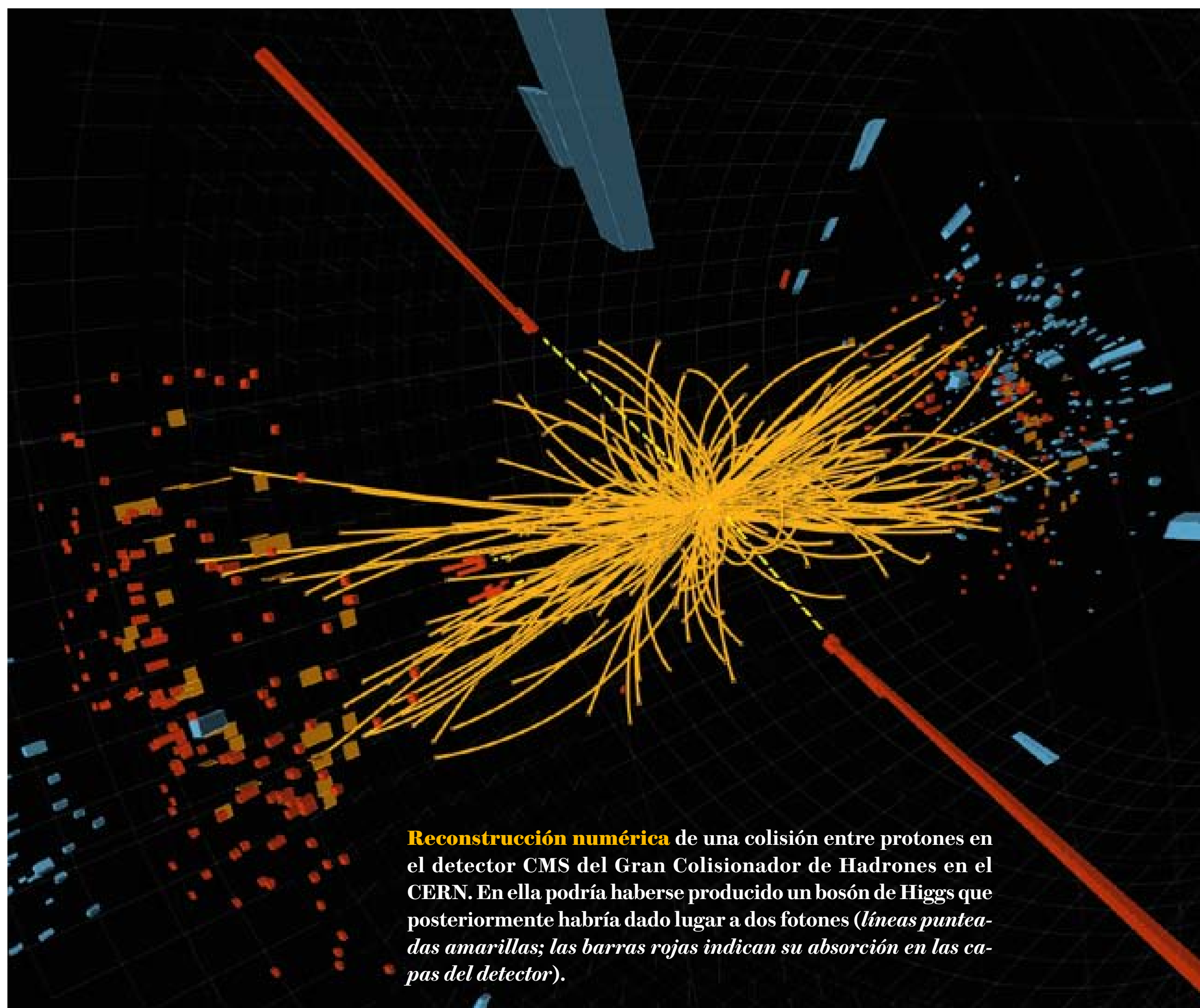
El modelo estándar incluye también varios tipos de bosones (partículas de espín entero), los cuales se encargan de transmitir las interacciones fundamentales enumeradas arriba. El más conocido de todos ellos es el fotón, cuyo intercambio entre partículas dotadas de carga eléctrica da cuenta de la interacción electromagnética. Dado que los fotones carecen de masa, la fuerza electromagnética presenta un alcance infinito. No sucede lo mismo con las interacciones débiles, cuyos efectos se desvanecen a distancias superiores a los 10^{-18} metros. Ese corto radio de acción se debe a que las partículas transmisoras, los bosones W^+, W^- y Z, poseen una masa muy elevada: 80 y 91 gigaelectronvoltios (GeV), equiparable a la de un átomo

EN SÍNTESIS

La nueva partícula descubierta en el CERN posee espín entero y una masa aproximada de 125 GeV. Los expertos aún deben comprobar que sus propiedades coinciden con las esperadas del bosón de Higgs.

El bosón de Higgs tiene espín cero. La intensidad de sus acoplamientos con el resto de las partículas es proporcional a la masa de cada una de ellas y puede interaccionar consigo mismo.

Varios indicios sugieren que la nueva partícula podría no ser la palabra definitiva. Su estudio tal vez aporte pistas sobre nuevos fenómenos físicos más allá de los descritos por el modelo estándar.



Reconstrucción numérica de una colisión entre protones en el detector CMS del Gran Colisionador de Hadrones en el CERN. En ella podría haberse producido un bosón de Higgs que posteriormente habría dado lugar a dos fotones (*líneas punteadas amarillas; las barras rojas indican su absorción en las capas del detector*).

de tamaño medio. Su masa es tan alta que no fueron detectados en los experimentos del CERN hasta 1983. La existencia del fotón, en cambio, se conoce desde los trabajos de Einstein de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico. (Los gluones, los transmisores de la interacción nuclear fuerte, carecen también de masa, al igual que el fotón.)

EL ORIGEN DE LA MASA

¿Cómo explicar que los bosones *W* y *Z* posean masa? ¿Y de dónde procede la masa de los fermiones, los componentes de la materia? Si en las ecuaciones asignamos ad hoc masa a las partículas, obtendremos una teoría inconsistente que realiza predicciones absurdas. En 1964, François Englert y Robert Brout y, de forma independiente, Peter Higgs, propusieron un mecanismo matemático que evitaba tales incoherencias. Esa fue la solución que se aplicó al modelo estándar.

Mediante el mecanismo de Englert-Brout-Higgs, la propiedad que medimos como la «masa» de una partícula proviene de la interacción permanente de dicha partícula con un campo, o «sustancia», que llena todo el universo. Algunas partículas, como los bosones *W* y *Z*, se acoplan de manera más intensa con ese campo universal, lo que les confiere una masa elevada. Otras, como el fotón, no interaccionan en absoluto con dicho campo, por lo que conservan una masa nula.

CERN

En su versión elemental, el mecanismo de Englert-Brout-Higgs constituye el modelo teórico más sencillo que permite dar cuenta de la diferencia de masa entre el fotón y los bosones *W* y *Z*, y, al mismo tiempo, explicar la masa de las partículas de materia. Existen, no obstante, otras propuestas que también resuelven el problema. Por ejemplo, además de las tres dimensiones espaciales que percibimos, el universo podría poseer dimensiones suplementarias, compactas y tan diminutas que serían imperceptibles a nuestra escala. Cada especie de partícula se comportaría de una manera distinta en el interior de esas dimensiones adicionales, lo cual justificaría la disparidad en los valores de las masas.

La existencia del campo de Englert-Brout-Higgs quedará demostrada cuando encontremos la partícula asociada a dicho campo. (En la teoría cuántica, toda partícula aparece como el cuanto, o excitación elemental, de cierto campo.) Fue Higgs quien, en 1964, apuntó que el mecanismo propuesto implicaba la existencia de cierta partícula, la cual más tarde pasaría a conocerse como bosón de Higgs. En la versión más sencilla posible —la adoptada en el modelo estándar— existe un solo bosón de Higgs. En otras teorías, sin embargo, no se requiere ningún bosón de Higgs o, por el contrario, se necesitan varios de ellos. Solo los resultados experimentales nos permitirán distinguir entre tales posibilidades.

Algunos artículos de principios de los años setenta examinaban la posibilidad de producir y detectar el bosón de Higgs en un colisionador de partículas. El primer estudio sistemático fue propuesto en 1975 por Mary Gilliard, Dimitri Nanopoulos y quien escribe estas líneas. Discutimos la producción de partículas de Higgs a partir de bosones *W* y *Z*, y su posterior desintegración en fotones o partículas de masa no nula.

Los primeros proyectos para detectar el bosón de Higgs tuvieron lugar en el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP) del CERN entre 1989 y 2000. Aquellos experimentos permitieron concluir que, en caso de existir, su masa debía superar los 114 GeV. Mientras tanto, el acelerador Tevatrón del laboratorio Fermilab, cerca de Chicago, excluyó un intervalo de masas en torno a los 160 GeV. Por último, las medidas de precisión sobre las propiedades de la interacción electrodébil (una descripción unificada de las interacciones débiles y electromagnéticas) efectuadas en el LEP, el Tevatrón y otros experimentos parecían indicar que, con una buena probabilidad, la partícula de Higgs poseería una masa comprendida entre las dos zonas excluidas por el LEP y el Tevatrón.

La investigación del bosón de Higgs constituye una de las prioridades del programa experimental del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, el descomunal acelerador de protones que sucedió al LEP. Los detectores ATLAS y CMS han sido optimizados para tal fin. Tras comenzar sus operaciones en 2009, a finales de 2011 se detectaron los primeros indicios de una partícula similar al bosón de Higgs [*véase* «¿Está la partícula de Higgs asomando la cabeza?», por Alberto Casas; Investigación y Ciencia, febrero de 2012]. El pasado 4 de julio, la acumulación de datos experimentales permitió confirmar el descubrimiento

¿QUÉ DICEN LOS DATOS?

La búsqueda experimental del bosón de Higgs en el LHC

Producción y detección de una partícula esquiva

FABIEN TARRADE

El descubrimiento de la nueva partícula constituye el epílogo de un proceso complejo. Para entender las pruebas que delatan su existencia y calibrar hasta qué punto sus propiedades se corresponden con las esperadas del bosón de Higgs, hemos de recorrer los pasos dados por este proyecto.

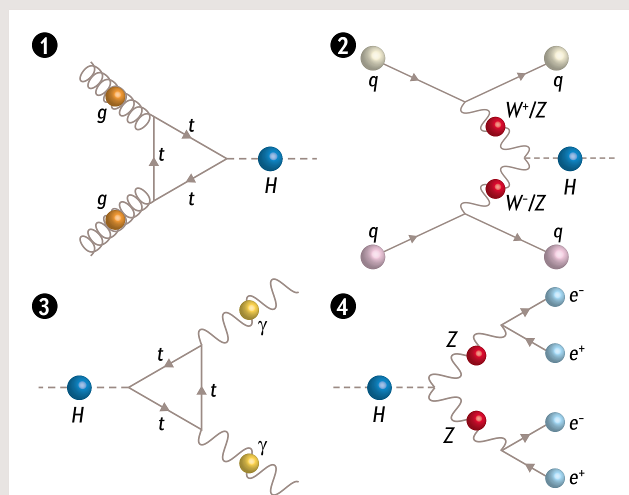
En primer lugar, los experimentos deben llevarse a cabo en un ambiente controlado, como el que proporciona el Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Dado que la partícula que deseamos producir posee una gran masa (si bien la teoría no predice su valor concreto), necesitamos que la energía de las colisiones sea lo más elevada posible. El LHC hace chocar protones con una energía de 8 teraelectronvoltios en cada colisión. Sin embargo, no toda esa energía se emplea en generar bosones de Higgs, ya que en los procesos implicados solo participan algunos quarks o gluones (los elementos que componen el protón), los cuales únicamente transportan una pequeña fracción de la energía total. De hecho, la producción de un bosón de Higgs ocurre con muy poca frecuencia: una vez por cada 65.000 millones de colisiones.

En el LHC tienen lugar unos 20 millones de colisiones por segundo. La cantidad de datos generada resulta tan descomunal que un sistema informático debe preseleccionar los sucesos más interesantes. Tras la criba, la cantidad de colisiones que deben estudiarse equivale a unas 300 por segundo.

El bosón de Higgs es una partícula inestable, con una vida media demasiado corta como para poder detectarlo de manera directa. Se desintegra con rapidez en otras partículas, como pares de fotones o cuatro leptones. El papel de los detectores consiste en registrar las características de las partículas producidas en cada colisión e identificar aquellas que podrían provenir de la desintegración de un bosón de Higgs.

Un detector como ATLAS consta de varias capas concéntricas. La más próxima a la colisión reconstruye la trayectoria de las partículas dotadas de carga eléctrica y mide su momento y su carga. Después, los calorímetros detienen la mayoría de las partículas y registran su energía. El primero de ellos determina la energía de electrones y fotones; el segundo absorbe los hadrones. Los muones, que interaccionan con menor intensidad, son detectados en las capas más externas. Los neutrinos atraviesan el conjunto del dispositivo sin dejar rastro, por lo que su presencia se traduce en un déficit en el balance energético del proceso. Al combinar todos estos datos, podemos reconstruir los productos generados en una colisión.

El estudio de la desintegración de un bosón de Higgs en dos fotones reviste gran complejidad, ya que otros procesos mucho más comunes producen también pares de fotones. Estos últimos constituyen lo que denominamos «ruido de fondo», en contraposición a la «señal» (aquellos procesos en los que en verdad interviene un bosón de Higgs). Separar señal y ruido requiere un análisis complejo. El primer paso consiste en modelizar todos los tipos de colisiones y su interacción con el detector. A fin de cerciorarnos de que las simulaciones reproducen con fidelidad lo que sucede en el interior del detector, estas se comparan con los datos empíricos obtenidos en aquellas colisiones que conoce-



El bosón de Higgs (*H*) puede generarse a partir de la fusión de dos gluones, por medio de un bucle intermedio de quarks virtuales de tipo *t* ❶, o a partir de la fusión de un par de bosones *W* o *Z*, emitidos a su vez por sendos quarks ❷. Dos formas de desintegración características vienen dadas por la generación de dos fotones (γ) a través de un bucle de quarks ❸, o por la creación de bosones *Z* y la posterior producción de pares electrón-positrón ($e^{+/-}$, ❹).

POUR LA SCIENCE

de una partícula con una masa de a unos 125 GeV y cuyas propiedades resultaban similares a las esperadas del bosón de Higgs [*véase* «El descubrimiento del bosón de Higgs», por Alberto Casas; Investigación y Ciencia, agosto de 2012].

Dado que su vida media es demasiado corta, la partícula no puede ser observada directamente. Se desintegra con gran rapidez en otros productos, los cuales deben ser identificados por los aparatos de medida. Entre otras posibilidades, el bosón de Higgs puede dar lugar a dos fotones; a pares de bosones *W* o *Z*; o a pares formados por un quark *b* y su antipartícula. Los experimentos ATLAS y CMS han observado señales claras de la existencia de una nueva partícula que se desintegra en dos fotones y en bosones *Z*. Por su parte, los detectores D0 y CDF, del acelerador Tevatrón, obtuvieron indicios de la producción de quarks de tipo *b*.

LAS PROPIEDADES DEL NUEVO BOSÓN

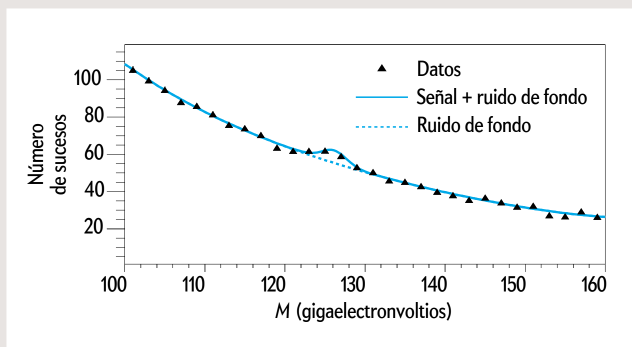
Los datos anteriores permiten proclamar con total certeza que se ha descubierto una nueva partícula. El estudio de su espín indica que este posee un valor entero, por lo que se trata de un bosón. Además, sabemos que difiere del de los bosones *W* y *Z* (partículas de espín uno), de modo que ha de ser cero, tal y como predice el mecanismo de Englert-Brout-Higgs, o dos. Determinar con certeza el espín del nuevo bosón constituye una de las prioridades en estos momentos. Para ello, una posibilidad consiste en medir la distribución angular de los fotones y el resto de las partículas producidas en su desintegración. Tales estudios requieren gran cantidad de datos experimentales, los cuales quizá se hallen disponibles en breve.

Otra de las propiedades que habremos de determinar con precisión es el acoplamiento del nuevo bosón con el resto de las partículas; es decir, la intensidad con la que interacciona con cada una de ellas. La teoría predice que, para que el bosón de Higgs explique la masa de las partículas, su acoplamiento con cada especie ha de ser proporcional a la masa de esta última. Algunos de esos valores podrán obtenerse directamente a partir del estudio de su desintegración en bosones *Z* y *W*, en pares de quarks *b*, o en pares de tauones. El resto deberá determinarse de manera indirecta a partir de su desintegración en fotones; un proceso que conlleva la producción intermedia de quarks *t*, los cuales se acoplan al bosón de Higgs por un lado, y a los fotones por el otro. En un artículo reciente escrito junto con Tevong Yu, del Colegio Imperial de Londres, demostramos que las interacciones de la nueva partícula se corresponden de manera aproximada con las esperadas para el bosón de Higgs. Una vez que dispongamos de más datos, podremos verificar con una precisión de hasta el 10 por ciento los acoplamientos del nuevo bosón.

Una tercera propiedad clave procede de la interacción de la partícula consigo misma. El bosón de Higgs del modelo estándar posee autoacoplamientos triples y cuádruples (los cuales corresponden, en los diagramas de Feynman, a la concurrencia de tres y cuatro bosones de Higgs en un mismo vértice). Medir el acoplamiento entre cuatro bosones de Higgs se prevé muy complicado. Sin embargo, si el LHC produce un número suficiente de colisiones, en algunas de ellas se observará la interacción entre dos bosones de Higgs mediante un proceso en el que intercambian un tercer bosón de Higgs, lo que permitiría estimar el valor del autoacoplamiento triple.

Al medir esas propiedades, podremos evaluar si nos encontramos ante la versión más simple del mecanismo de Englert-Brout-Higgs o si, por el contrario, nos enfrentamos a un escenario alternativo. Existen buenas razones para creer que el modelo más sencillo, en el que hay un solo bosón de Higgs, no basta para explicar por completo la masa de las partículas. En el marco del modelo estándar, si la masa del bosón del Higgs es realmente inferior a 127 GeV, el campo de Englert-Brout-Higgs no se encontraría en su estado de energía más baja, sino en una configuración inestable (de energía superior a la mínima) que, en cualquier momento, podría oscilar y «caer» hacia un estado de menor energía. De ocurrir algo así, las leyes de la física cambiarían de manera súbita y el universo tal y como lo conocemos dejaría de existir. Es cierto que el universo podría mantenerse en ese estado inestable durante un tiempo mucho mayor que el que ha transcurrido desde la gran explosión. Sin embargo, la existencia de una inestabilidad tal nos estaría indicando que la teoría es incompleta.

Otra dificultad reside en la masa del propio bosón de Higgs. En el modelo estándar, su masa viene dada por un parámetro li-



Relación de sucesos con dos fotones obtenida en el experimento ATLAS en función de la masa *M* de la partícula que los originó. El ruido de fondo decrece de forma exponencial; la señal aparece como un exceso localizado en torno a los 125 gigaelectronvoltios.

mos bien y en las que sabemos que no interviene el bosón de Higgs. Esta fase puede llevar desde semanas hasta años.

Después se procede al estudio de aquellos fenómenos en los que se espera que se creen bosones de Higgs. Tal es el caso, por ejemplo, de los sucesos en los que se producen dos fotones. Sus características permiten averiguar la masa de la partícula que los originó. En función de esa masa, obtenemos una distribución estadística de eventos en la que el ruido puede reconocerse con facilidad, debido a su perfil exponencial, y donde la señal se manifiesta como un pequeño pico sobre el ruido esperado de fondo.

Debido al gran número de sucesos, no siempre podemos distinguir una señal a simple vista. Por ello, empleamos métodos estadísticos que estiman la probabilidad de que el ruido de fondo produzca un exceso similar a la señal. Cuando dicha probabilidad resulta inferior a una parte en tres millones (correspondiente a cinco desviaciones estándar en una distribución gaussiana), consideramos que la señal es fidedigna. Esto es lo que han obtenido los equipos del CERN. La partícula, con una masa de unos 125 gigaelectronvoltios, guarda grandes semejanzas con el buscado bosón de Higgs; pero, tal y como explica John Ellis, aún queda mucho trabajo por delante para entender por completo sus propiedades.

Fabien Tarrade es miembro de la colaboración ATLAS del CERN e investiga en la Universidad de Carleton (Canadá)

ATLAS

bre, que bien podríamos tomar igual a 125 GeV si se tratase de la partícula descubierta en el LHC. Sin embargo, en el cálculo teórico de la masa del bosón de Higgs, deben tenerse en cuenta las correcciones debidas a los procesos cuánticos (las originadas por las interacciones con las partículas virtuales del vacío cuántico). Al evaluarlas, su contribución al valor final de la masa resulta ser infinita. Existe una manera de absorber todas esas correcciones matemáticas e imponer que el valor final de la masa coincida con el medido en los experimentos, pero solo a costa de ajustar de manera artificial y con una precisión increíble los parámetros del modelo estándar. Sería preferible contar con una solución natural que evitase ese tipo de arreglos.

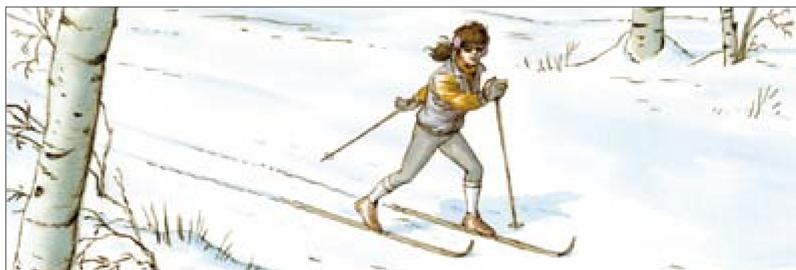
Una manera de resolver el problema consiste en suponer que el bosón de Higgs no es una partícula elemental, sino un objeto compuesto dotado de estructura interna (del mismo modo que el protón se halla formado por tres quarks, o que el mesón pi consta de un quark y un antiquark). En las teorías de la superconductividad o en la de las interacciones fuertes, los campos compuestos producen una ruptura espontánea de simetría análoga a la que predice el mecanismo de Englert-Brout-Higgs. Por ello, numerosos expertos creen que algo similar podría ocurrir en el modelo estándar. Si bien hasta ahora no existe ningún modelo completamente satisfactorio que implemente esta idea, algunas soluciones parciales permiten calcular los acoplamientos del bosón de Higgs con otras partículas. Dado que estos difieren de los predichos por el modelo estándar, los resultados del LHC deberían poder contrastar ciertos modelos y descartar algunos de ellos.

Muchos piensan que si, por el contrario, el bosón de Higgs fuese una partícula elemental, debería formar parte de un marco teórico más amplio que el que nos brinda el modelo estándar. Una de tales propuestas es la supersimetría. Según esta, por cada partícula del modelo estándar debería existir una compañera de características similares pero con distinto espín. En tales modelos, las correcciones cuánticas a la masa del bosón de Higgs provenientes de las partículas supersimétricas cancelan las contribuciones debidas a las partículas del modelo estándar, de modo que la masa del bosón de Higgs permanece finita sin necesidad de imponer ajustes artificiales. Por otro lado, en un escenario supersimétrico, el universo se encontraría hoy en un estado estable y la masa del bosón de Higgs resultaría inferior a los 130 GeV, tal y como parecen indicar los experimentos.

LA MASA Y EL CAMPO DE HIGGS

Partículas de masas diferentes

El mecanismo de Englert-Brout-Higgs confiere una masa no nula a los bosones *W* y *Z*, así como a todas las partículas de materia del modelo estándar. A tal fin postula la existencia de un campo físico que llena todo el universo. Cada tipo de partícula interacciona de manera más o menos intensa con el campo de Englert-Brout-Higgs, lo cual determina su inercia a desplazarse. Esa propiedad es la que nosotros medimos como la «masa» de cada partícula. El efecto puede compararse con el movimiento de una persona a través de una superficie nevada.



Un esquiador que avanza con facilidad se comporta como una partícula de masa ínfima. El fotón, que posee una masa nula, no interacciona en absoluto con el campo de Englert-Brout-Higgs.



Con unas raquetas, el desplazamiento resulta más costoso. La situación ilustra el caso de una partícula ligera que, como el electrón, interacciona con poca intensidad con el campo de Englert-Brout-Higgs.



Un excursionista con botas se hunde en la nieve y se mueve con gran lentitud, como si fuese muy pesado. Este ejemplo simboliza lo que sucede con los bosones *W* y *Z*, los cuales se acoplan con gran intensidad al campo de Englert-Brout-Higgs.

BRUNO VACARO

MÁS DE UN BOSÓN DE HIGGS

Los modelos supersimétricos no predicen uno, sino cinco bosones de Higgs. De ellos, el más ligero exhibiría un comportamiento ligeramente diferente al del bosón de Higgs del modelo estándar. En estos momentos se ha abierto la veda para encontrar bosones de Higgs adicionales y detectar señales delatoras de supersimetría en las desintegraciones del bosón recién descubierto.

Además de estudiar la nueva partícula y buscar otros bosones de Higgs, los físicos intentan hallar señales directas de la producción de partículas supersimétricas. En varios modelos, la partícula supersimétrica más ligera carece de carga eléctrica, se acopla a las demás partículas por medio de la interacción débil y es estable. Una

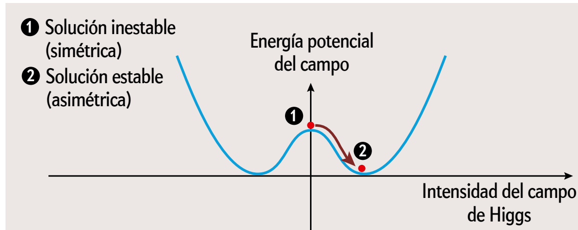
RUPTURA DE SIMETRÍA

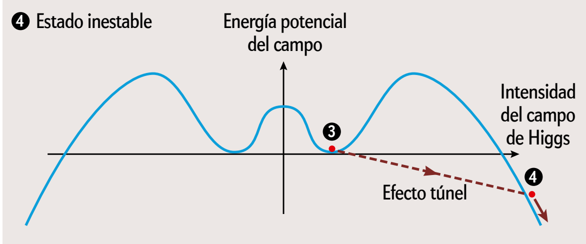
El campo de Higgs y el estado fundamental del universo

El mecanismo de ruptura espontánea de simetría adoptado en el modelo estándar parte de la hipótesis de que las ecuaciones básicas de la teoría poseen cierta simetría, pero no así sus soluciones. Al campo de Englert-Brout-Higgs se le supone asociada cierta energía potencial (*curva azul*), la cual depende del valor que tome dicho campo. Como todo sistema físico, este tenderá de manera natural a adoptar el estado de mínima energía, o estado fundamental.

Un universo estable

Una intensidad de campo nula corresponde a una solución simétrica ❶. Esta, sin embargo, no posee la mínima energía posible, por lo que se trata de una solución inestable. Se produce entonces una transición espontánea hacia el estado de menor energía ❷. Aunque estable, este carece de la simetría original. La intensidad del campo de Englert-Brout-Higgs adopta así un valor no nulo en todos los puntos del espacio, lo cual permite explicar la masa de las partículas.





¿Un universo inestable?

La nueva partícula descubierta en el LHC posee una masa de unos 125 gigaelectronvoltios (GeV). Sin embargo, para un bosón de Higgs de masa inferior a 127 GeV, las correcciones cuánticas modificarían el perfil de la energía potencial: la posición ❸ no se correspondería con la de mínima energía, sino solo con una solución metaestable.

Por efecto túnel, el campo podría dirigirse hacia la posición ❹, tras lo cual su intensidad continuaría creciendo sin límite. Esa transición modificaría de manera radical las leyes físicas del universo, que dejaría de existir tal y como lo conocemos. Dado que en 13.700 millones de años (la edad del universo) algo así no ha sucedido, un bosón de Higgs con una masa de 125 GeV podría constituir una señal de física más allá del modelo estándar.

gran cantidad de ellas deberían haberse producido durante los primeros instantes del universo, por lo que constituyen unas candidatas ideales a componer la materia oscura cósmica, cuya existencia ha sido postulada para explicar numerosas observaciones astrofísicas y cosmológicas [*véase* «Mundos oscuros», por J. Feng y M. Trodden; Investigación y Ciencia, enero de 2011]. En el LHC, la producción de dichas partículas supersimétricas debería dar lugar a sucesos en los que parte de la energía y el momento de la colisión «desaparecen» (ya que tales partículas escaparían de los detectores sin dejar rastro). En el LHC, estos procesos aún no han sido observados con una frecuencia suficiente como para poder atribuirles causas ajenas al modelo estándar. Las posibilidades de observar tales fenómenos aumentarán de manera considerable a partir de 2015, cuando el LHC opere a pleno rendimiento con colisiones de mayor energía (14 teraelectronvoltios, frente a los 8 actuales).

Por último, el bosón de Higgs podría proporcionarnos nuevas pistas sobre cuestiones aún abiertas en física de partículas y cosmología. De acuerdo con la teoría de la gran explosión que dio origen a nuestro universo, materia y antimateria debieron producirse a partes iguales, por lo que tendrían que haberse aniquilado en fotones. Entonces, ¿por qué el cosmos contiene materia, pero no antimateria? Esta cuestión quedaría resuelta si existiese una asimetría entre el comportamiento de partículas y antipartículas, responsable de un ligero exceso en la creación de materia. El modelo estándar posee una asimetría de ese tipo, pero demasiado diminuta para explicar la abundancia de materia en el universo actual. La supersimetría y otros modelos exhiben otras fuentes de asimetría que podrían dar cuenta del fenómeno, las cuales tal vez se manifiesten de manera directa o indirecta en las propiedades del bosón de Higgs.

Si la nueva partícula descubierta en el LHC se corresponde con el bosón de Higgs, habremos completado nuestra descripción de la materia visible del universo y de los procesos que rigieron la gran explosión después de la primera milmillonésima de segundo en la vida del cosmos. El bosón de Higgs podría guardar una relación con la materia oscura y con la producción primordial de materia en el universo. Se trata, no obstante, de una partícula muy diferente de todas las que conocemos, la cual plantea casi tantos interrogantes como los que resuelve. Su misma existencia y el valor concreto de su masa sugieren que el modelo estándar no puede ser la última palabra en nuestra comprensión de las leyes físicas, lo cual abre las puertas a que el LHC nos revele nuevos fenómenos. La búsqueda continúa.

PARA SABER MÁS

Los artículos originales sobre el mecanismo de ruptura espontánea de simetría (por F. Englert y R. Brout; P. Higgs; y G. S. Guralnik, C. R. Hagen y T. W. Kibble) fueron publicados en 1964 en *Physical Review Letters*. Hoy son de acceso libre y pueden consultarse en **prl.aps.org/50years/milestones#1964.**

Observation of a new particle in the search for the standard model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Colaboración ATLAS en *Physics Letters B*, vol. 716, n.º 1, págs. 1-29, septiembre de 2012 (acceso libre).

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. Colaboración CMS en *Physics Letters B*, vol. 716, n.º 1, págs. 30-61, septiembre de 2012 (acceso libre).

La búsqueda del bosón de Higgs. Martine Bosman y Teresa Rodrigo en *Investigación y Ciencia* n.º 432, septiembre de 2012.

MEDIOAMBIENTE

ECOSISTEMAS



DEL

AL BORDE

COLAPSO

Para impedir que medusas, hongos y otros organismos se apoderen de los hábitats sanos, los científicos exploran las redes tróficas y los puntos sin retorno

Carl Zimmer

FOTOGRAFÍA DE DAVID LIITTSCHWAGER

Carl Zimmer es autor de una docena de libros sobre evolución y neurociencia y escribe con regularidad sobre ciencia en periódicos y revistas como *The New York Times*, *National Geographic* y *Discover*.



El lago Peter se halla en lo profundo de un bosque de arces cerca de la frontera entre los estados de Wisconsin y Michigan. Un día de julio de 2008, un grupo de científicos dirigidos por el ecólogo Stephen Carpenter, de la Universidad de Wisconsin-Madison, se acercaron al lago con algunos peces. De una en una, dejaron caer en el agua doce percas americanas *(Micropterus salmoides)*. Antes de abandonar la zona, introdujeron en el lago sensores que medían la claridad del agua cada cinco minutos durante las 24 horas del día.

El grupo realizó otras dos veces el mismo viaje en 2009. En cada ocasión liberaron 15 percas más. Pasaron los meses y el lago atravesó el ciclo de las estaciones. Se heló, se desheló y volvió a bullir de vida. Después, en verano de 2010, experimentó un cambio espectacular. Antes del inicio del experimento, en el lago abundaban carpitas cabezonas (*Pimephales promelas*), percas sol (*Lepomis gibbosus*) y otros peces pequeños. Pero esos depredadores antaño dominantes ahora escaseaban, ya que la mayoría habían sido devorados por las percas americanas. Los pocos supervivientes se escondían en los bajíos. Las pulgas de agua y otros animales diminutos, antes consumidos por los peces pequeños, prosperaban con total libertad. Y debido a que los animales diminutos ramonean algas, el agua del lago se había vuelto más clara. Dos años después, el ecosistema permanece en su estado alterado.

La red trófica del lago Peter, desde hacía tiempo en un estado estable, ha adquirido una nueva organización. Carpenter ha provocado esta situación a propósito, como parte de un experimento que está realizando. Analiza los factores que conducen a cambios persistentes en esa comunidad de organismos que se alimentan unos de otros. En décadas recientes, redes tróficas de todo el mundo han sufrido asimismo alteraciones, a veces de modo inesperado, a una escala mucho mayor. Las medusas dominan ahora las aguas frente a las costas de Namibia. Caracoles hambrientos y hongos están infestando las marismas costeras de Carolina del Norte y provocan su degradación. En el Atlántico noroccidental, los bogavantes proliferan mientras el bacalao ha entrado en declive.

Ya sea a causa de la pesca, la conversión de la tierra en campos agrícolas y ciudades, o el calentamiento global, se están produciendo tensiones enormes sobre los ecosistemas del planeta. Como resultado, se esperan alteraciones en otras muchas redes tróficas en los años próximos. Pero predecir esos cambios drásticos no resultará nada fácil, porque las redes pueden presentar una complejidad asombrosa.

Ahí es donde Carpenter entra en escena. Después de 30 años de investigaciones en el lago Peter, él y sus colaboradores desarrollaron modelos matemáticos de redes ecológicas que les permitieron detectar señales de alerta temprana del cambio que se acercaba, 15 meses antes de la perturbación.

Con ayuda de los modelos, Carpenter y otros están empezando a descifrar algunas de las reglas que determinan si una red trófica permanecerá estable o cruzará un umbral y experimentará un cambio notable. Esperan emplear esos conocimientos para realizar un seguimiento del estado de los ecosistemas e identificar así los que se hallen al borde del colapso. En teoría, un sistema de alerta temprana nos informaría sobre cuándo deben modificarse las actividades humanas que están impeliendo a un ecosistema hacia su destrucción, o incluso nos permitiría recuperar los ecosistemas desde su situación límite. La prevención es la clave, afirman, porque una vez los ecosistemas alcanzan un punto de inflexión resulta muy difícil restaurarlos.

DEPREDADORES MATEMÁTICOS

El trabajo de Carpenter se fundamenta en un siglo de investigación básica en ecología que ha buscado dar respuesta a una pregunta sencilla: ¿Por qué las poblaciones de las diferentes especies son como son? ¿Por qué, por ejemplo, hay tantas moscas y tan pocos lobos? ¿Y por qué el tamaño de las poblaciones de moscas varía tanto de un año a otro? Para averiguarlo, se empezaron a dibujar las redes tróficas donde se indicaba quién se comía a quién y en qué cantidad. Pero esas redes pueden abarcar docenas, cientos o miles de especies; su complejidad ha convertido a menudo los esquemas en marañas imposibles [*véase* «Redes mutualistas de especies», por J. Bascompte y P. Jordano; Investigación y Ciencia, septiembre de 2008].

EN SÍNTESIS

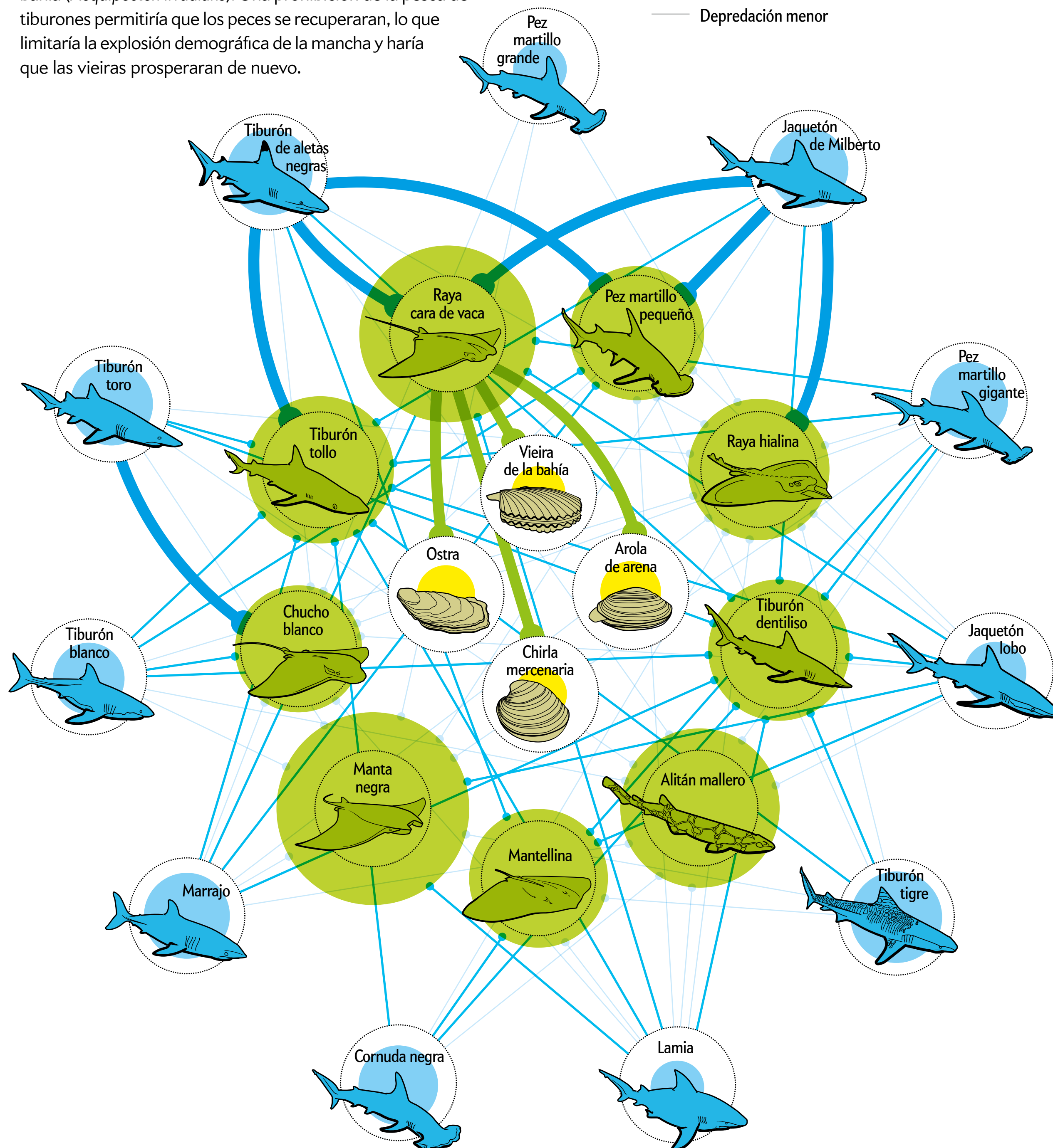
Las redes tróficas son complejas, pero los modelos matemáticos revelan conexiones críticas que, al ser perturbadas, pueden llevar a un estado diferente, o incluso provocar el colapso del ecosistema.

Una vez que la red trófica ha adquirido un nuevo estado, resulta improbable que retorne a su situación original.

Los experimentos en los lagos Peter y Paul, cerca de la frontera entre Michigan y Wisconsin, demuestran que los modelos pueden predecir los cambios de estado antes de que sucedan, lo que ofrece la oportunidad de intervenir en el ecosistema para restaurarlo.

Menos tiburones, menos vieiras

Se pensaba que las redes tróficas se hallaban estructuradas de abajo arriba. Sin embargo, se está descubriendo que a menudo los depredadores culminales controlan la cadena, directa e indirectamente. Un estudio realizado por Julia Baum, hoy en la Universidad de Victoria, en la Columbia Británica, y otros investigadores demuestra que la sobrepesca de grandes tiburones (*azul*) en aguas de los Estados Unidos orientales ha permitido que los depredadores de niveles intermedios (*verde*) aumenten en número, en especial la raya cara de vaca o mancha (*Rhinoptera bonasus*). A su vez, la población en expansión ha devastado determinadas especies de marisco (*amarillo*), sobre todo las vieiras de la bahía (*Aequipecten irradians*). Una prohibición de la pesca de tiburones permitiría que los peces se recuperaran, lo que limitaría la explosión demográfica de la mancha y haría que las vieiras prosperaran de nuevo.



FUENTES: «CASCADING TOP-DOWN EFFECTS OF CHANGING OCEANIC PREDATOR ABUNDANCES», POR JULIA K. BAUM Y BORIS WORM EN *JOURNAL OF ANIMAL ECOLOGY*, VOL. 78, N.º 4, JULIO DE 2009, Y «CASCADING EFFECTS OF THE LOSS OF APEX PREDATORY SHARKS FROM A COASTAL OCEAN», POR RANSOM A. MYERS, JULIA K. BAUM, TRAVIS D. SHEPHERD Y CHARLES H. PETERSON EN *SCIENCE*, VOL. 315, 30 DE MARZO DE 2007; ILUSTRACIONES DE PORTIA SLOAN ROLLINGS; GRÁFICO DE JEN CHRISTIANSEN







Herida imprevista: **La eliminación de los lobos del Parque Nacional de Yellowstone dio lugar a una proliferación de uapitíes que, al ramonear las hojas de álamos temblones, provocaron la destrucción de numerosos árboles jóvenes.**

HANS REINHARD, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*lobo*); GERRY ELLIS, GETTY IMAGES (*uapití*); DAVID SUCSY, MINDEN PICTURES (*álamos*)

Para desentrañar esas marañas, los ecólogos han transformado las redes tróficas en modelos matemáticos. Averiguan la ecuación que describe el crecimiento de la población de una especie al relacionar su tasa de reproducción con la cantidad de alimento que puede obtener y con la frecuencia con que es depredada por otra especie. Puesto que esas variables pueden cambiar, resolver las ecuaciones de las redes tróficas, incluso las simples, ha resultado abrumador. Por suerte, el auge de ordenadores potentes y baratos ha permitido programar simulaciones de diferentes tipos de ecosistemas.

A partir de ese trabajo, se han descubierto algunos principios clave que operan en las redes tróficas reales. Se ha visto que la mayoría de ellas están formadas por numerosas conexiones laxas, en lugar de unas pocas y fuertes. Dos especies se hallan estrechamente relacionadas si interaccionan mucho, como un depredador que devora un gran número de individuos de una sola especie. Las especies relacionadas de forma débil solo interaccionan en ocasiones, como en el caso de un depredador que se alimenta de vez en cuando de distintas presas. Las redes tróficas suelen estar dominadas por las conexiones débiles porque, a la larga, tal disposición resulta más estable. Si un depredador captura presas de diversas especies, podrá sobrevivir a la extinción de una de ellas. Y si se centra en una que abunda cuando otra se ha vuelto escasa, el cambio permite a la presa original recuperarse. De esta manera, las conexiones laxas evitan que las especies se extingan unas a otras.

Los modelos matemáticos han revelado asimismo puntos vulnerables en las redes tróficas, en los que cambios pequeños pueden provocar efectos grandes en todo el ecosistema. En los años sesenta del siglo xx, los ecólogos teóricos propusieron que los depredadores situados en la cumbre de una red trófica ejercían un enorme control sobre el tamaño de las poblaciones de las demás especies, incluidas las que no sufrían su ataque directo. La idea de ese control jerárquico por una pequeña parte de los animales se recibió con escepticismo. No se entendía cómo unos pocos depredadores culminales podían tener un efecto tan notable sobre el resto de su red trófica.

Pero entonces los humanos iniciamos experimentos no planificados que pusieron a prueba esa idea, la denominada hipótesis de la cascada trófica. En el océano, pescábamos a escala industrial depredadores culminales, como el bacalao, mientras que en tierra eliminábamos a los grandes depredadores, como los lobos. Introducíamos especies invasoras en islas y producíamos otros tipos de impactos en los ecosistemas mundiales. Los resultados de esas acciones pusieron de manifiesto el papel clave de los depredadores y los efectos en cascada que ejercían desde la cima de una red trófica.

Como se había predicho, los cambios en ciertos depredadores provocaban un impacto enorme en las redes tróficas. La matanza de lobos en el Parque Nacional de Yellowstone había dado lugar a una proliferación de ciervos uapitíes y otros herbívoros. Los ciervos ramonearon las hojas de sauces y álamos temblones, y destruyeron numerosos árboles. Asimismo, en aguas de la costa oriental de Estados Unidos, los pescadores han devastado las poblaciones de ostras y vieiras sin haber capturado uno solo de esos bivalvos. Han provocado ese efecto al pescar y matar tiburones en cantidades enormes, lo que ha hecho prosperar a los pequeños peces depredadores de los que se alimentan los tiburones como la raya cara de vaca (*Rhinoptera bonasus*). Esta y otras rayas se alimentan de especies de marisco que viven sobre el fondo y, como consecuencia de su proliferación, han diezmado las poblaciones de ostras y vieiras.

PUNTO SIN RETORNO

Muchos de esos cambios drásticos han cogido a los ecólogos por sorpresa. Se han dado cuenta de que resulta importante prever el momento en que se producirá un cambio de ese tipo en una red trófica porque, una vez sucedido, no suele haber un camino de retorno. Hacer que una red trófica recupere su estado original representa una tarea ardua [*véase* «Límites de un planeta sano», por J. Foley; Investigación y Ciencia, junio de 2010].

En el Atlántico noroccidental las pesquerías de bacalao se hundieron al principio de la década de los noventa. Los bacalaos son depredadores voraces; con su desaparición se produjo una proliferación de sus presas, entre ellas el espadín, el capelán, los juveniles de bogavantes y cangrejos de las nieves. Para recuperar el bacalao, los gestores impusieron límites estrictos a su pesca, o incluso la prohibieron del todo. Los modelos matemáticos en los que se basaban indicaban que si se los dejaba en paz, los peces liberarían un número suficiente de huevos y crecerían lo bastante rápido como para restablecer sus poblaciones.

«Las predicciones para la recuperación eran de unos cinco a seis años», comenta Kenneth Frank, investigador de la Agencia de Pesquerías y Océanos del Canadá, en el Instituto Bedford de Oceanografía, que estudia las pesquerías de bacalao en las costas de Nueva Escocia y Terranova. Pero los cálculos fallaron. Pasados seis años, el bacalao no mostraba señales de recuperación. Al contrario, la especie languidecía y presentaba una población muy inferior a la anterior al colapso.

Frank y sus colaboradores entienden ahora la razón: las estimaciones iniciales se basaban solo en la velocidad de reproducción del bacalao, no en la organización de su red trófica. Los bacalaos adultos se alimentan de espadines, capelanes y otras especies, que en conjunto se denominan peces presa. Estos, a su vez, devoran animales diminutos del zooplancton, entre ellos los huevos y larvas de los propios bacalaos.

Antes de que la sobrepesca diezmara a los bacalaos, estos mantenían a raya a los peces presa, los que a su vez no consu-

mían tantos huevos y larvas como para hacer mella en la población de bacalao. Pero al ser mermada esta por los humanos, se volvieron las tornas. Los peces presa proliferaron en exceso y devoraron numerosos alevines de bacalao. Incluso a pesar de interrumpir la pesca, la especie no se recuperó.

Solo ahora están viendo Frank y sus colaboradores signos de una mejoría demorada. Después de que las poblaciones cayeran hasta el 1 por ciento de los valores anteriores al colapso, en los últimos años han aumentado hasta el 30 por ciento. La clave, dice Frank, reside en que los peces presa han experimentado tal explosión demográfica que están terminando con su propio sustento y están empezando a hundirse. Ahora que su población se ha reducido, los huevos y larvas del bacalao tienen mayores posibilidades de alcanzar la edad adulta. Si el bacalao recupera sus niveles anteriores, podrá mantener bajas, de nuevo, las poblaciones de peces presa. «Esta es la trayectoria que están siguiendo, pero nos aguardan numerosas sorpresas, porque esos sistemas son muy complejos», apunta Frank.

Las redes tróficas continuarán sufriendo alteraciones en todo el mundo. Algunas lo harán debido a la caza y a la pesca; otras experimentarán otras presiones. Por ejemplo, los peces león (varias especies de *Pterois*), nativos del Pacífico, se hicieron populares como peces de acuario en Estados Unidos, pero en la costa oriental, los aficionados a la acuicultura ornamental que se cansaron de ellos empezaron a liberarlos en el Atlántico, donde ahora amenazan a los arrecifes de coral del Caribe. Devoran tantas especies presa de tamaño reducido que se prevé que competirán con los depredadores nativos y harán disminuir sus poblaciones, entre ellas las de tiburones. El cambio climático está alterando asimismo las redes tróficas, al modificar, en algunos casos, las áreas de distribución de depredadores y presas. Sean cuales sean los causantes de los cambios, estos pueden llevar a los ecosistemas a un umbral crítico. Y si dichos ecosistemas rebasan ciertos límites, será muy difícil recuperarlos [*véase* «Redes tróficas marinas», por E. L. Rezende, E. M. Albert y M. A. Fortuna; Investigación y Ciencia, agosto de 2011].

EVITAR A TIEMPO EL COLAPSO

Algunos opinan que evitar la perturbación de las redes tróficas constituye una estrategia más efectiva que intentar restaurar las que han cambiado. Carpenter y sus colaboradores han estado desarrollando un sistema de alerta temprana que permite identificar el momento en que se producirán las alteraciones y ofrece una guía sobre cómo recuperar un ecosistema desde el punto sin retorno.

«Siempre se había creído que ese proceso era totalmente impredecible», dice Carpenter. De ahí que, hace ocho años, su grupo empezó a crear ecuaciones que reflejaran el funcionamiento de los ecosistemas. Incluían variables para factores tales como la tasa de reproducción de las especies y la tasa depredación entre ellas. Las ecuaciones produjeron modelos de ecosistemas que podían alcanzar puntos de inflexión, pasados los cuales adquirían de pronto un estado nuevo, igual que sucede en los ecosistemas reales.

También distinguieron modificaciones sutiles, pero distintivas, que aparecían mucho antes de que los ecosistemas virtuales cambiaran abruptamente, una versión ecológica de los retumbos distantes que preceden a una tormenta. Cuando un ecosistema era perturbado (por una variación repentina de la temperatura, pongamos por caso, o por el brote de una enfermedad), empezaba a costarle más de lo habitual retornar a su estado inicial. «A medida que se acerca a un punto de inflexión, se recupera más lentamente de las perturbaciones», apunta Marten Scheffer, ecólogo de la Universidad de Wageningen que ha trabajado con Carpenter en sistemas de alerta temprana.

Scheffer, Carpenter y sus colaboradores están comprobando sus modelos en una serie de experimentos. Algunos han tenido lugar en los confines bien controlados del laboratorio. El experimento de Carpenter en el lago Peter supuso el primer ensayo del sistema de alerta temprana en un ecosistema natural. Desde que empezaron a introducir percas americanas en el lago, los científicos realizaron registros diarios del zooplancton, el fitoplancton y los peces en sus aguas. También hicieron un seguimiento del vecino lago Paul, de tamaño parecido, en el que no habían intervenido. Cualesquiera cambios que tuvieran lugar en ambos lagos cabría atribuirlos por tanto a factores climáticos. En el verano de 2009, empezaron a observar subidas y bajadas rápidas en los niveles de clorofila en el lago Peter. La agitación se correspondía con las modificaciones sutiles que los modelos de Carpenter habían identificado antes del cambio drástico del ecosistema. El lago Paul, mientras tanto, no presentaba tales alteraciones.

Carpenter y sus colaboradores esperan desarrollar sistemas de supervisión que detecten fluctuaciones similares y permitan anunciar un cambio inminente en otros ecosistemas, desde humedales y bosques hasta océanos. «Hay que tener en cuenta numerosos aspectos complejos, pero funciona», dice Scheffer.

El objetivo, desde luego, es saber cuándo estamos empujando a un ecosistema hasta el borde del colapso, para que podamos cesar tal presión. Para comprobar esta idea, Carpenter está manipulando otra vez el lago Peter. En lugar de añadir depredadores culminales, esta vez añade fertilizantes, que probablemente conllevarán una proliferación de algas. Esto, a su vez, desencadenará cambios en todo el ecosistema lacustre. Carpenter supone que las poblaciones de varias de las especies de gran tamaño (entre ellas las percas americanas) caerán en picado y, después, permanecerán a unos niveles bajos. También espera obtener señales de aviso de ese cambio con meses de antelación, en forma de fluctuaciones en la clorofila y otras modificaciones sutiles. Una vez vea dichas señales, dejará de suministrar el fertilizante. Si se halla en lo cierto, el ecosistema retornará a su estado normal, en lugar de llegar a una situación irreversible. A modo de comparación, añadirá fertilizante al cercano lago Tuesday, pero no interrumpirá tal acción cuando lo haga en el lago Peter. De nuevo, el lago Paul seguirá sin tratarse, como situación de referencia.

Carpenter se muestra optimista de que el sistema de alerta temprana que está desarrollando funcionará no solo en lagos aislados, sino en cualquier ecosistema, gracias a la manera en que las redes ecológicas están organizadas. Pero ello no significa que siempre pueda predecirse un cambio drástico. Las ecuaciones que él y sus colaboradores han creado sugieren que algunas perturbaciones serán tan espectaculares y rápidas que no habrá tiempo de darse cuenta de su inminencia. «Las sorpresas continuarán», dice Carpenter, «aunque el sistema de alerta temprana proporcione la oportunidad de anticipar algunas de ellas antes de que se produzcan».

PARA SABER MÁS

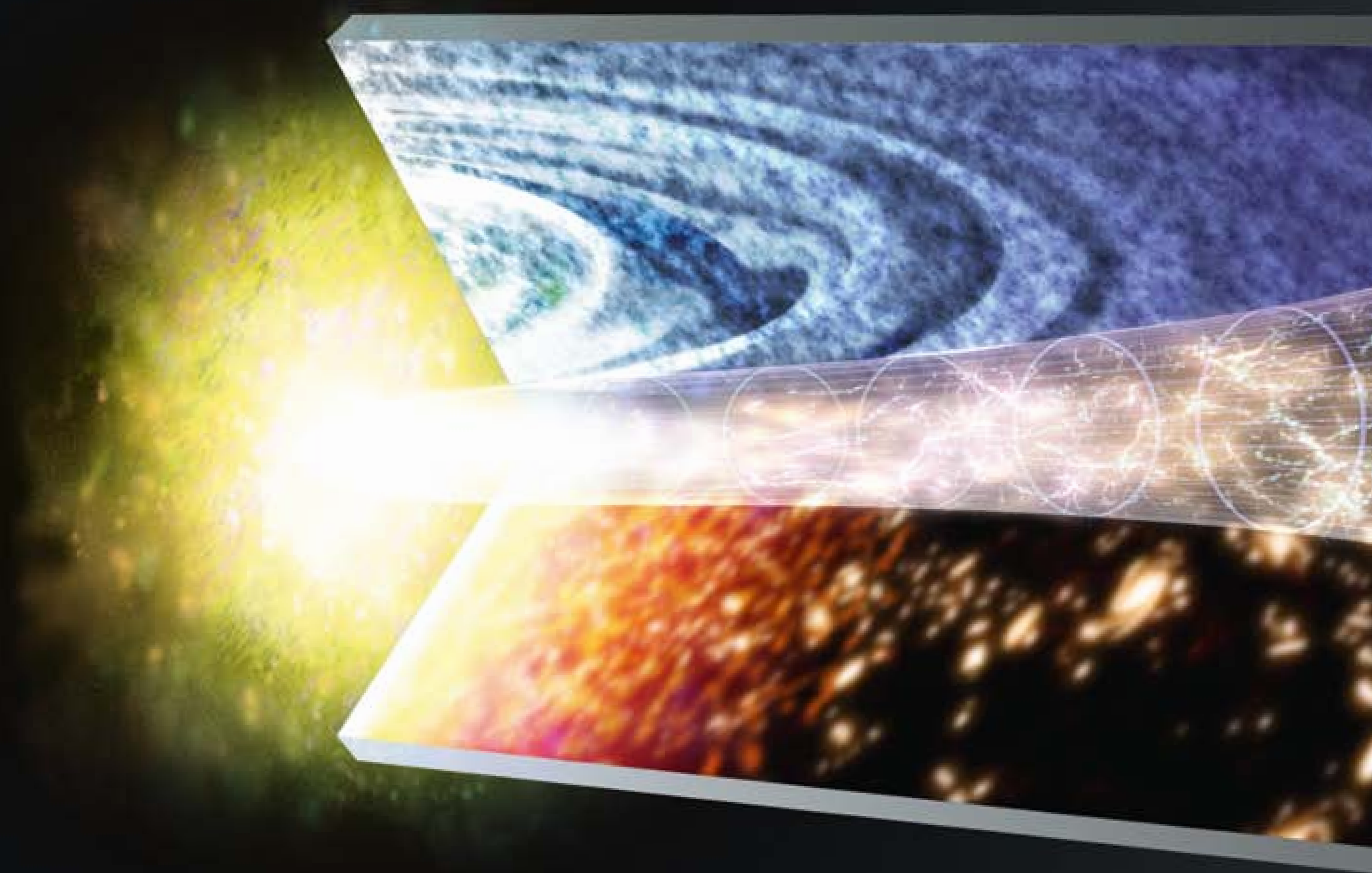
Human involvement in food webs. Donald R. Strong y Kenneth T. Frank en *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 35, págs. 1-23, noviembre de 2010.

Trophic cascades: Predators, prey, and the changing dynamics of nature. Dirigido por John Terborgh y James A. Estes. Island Press, 2010.

Food webs. Kevin S. McCann. Princeton University Press, 2011.

COSMOLOGÍA

UNA VENTANA AL PRIMER INSTANTE DEL UNIVERSO



Poco después de la gran explosión se generó un fondo de ondas gravitacionales que aún hoy permea el universo. Su detección permitiría observar cómo era el cosmos una fracción de segundo después de su origen

Daniel G. Figueroa y Juan García-Bellido

NASA (ADAPTACIÓN)



Juan García-Bellido es investigador en el Instituto de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Sus intereses se centran en la cosmología teórica, la formación de galaxias y la naturaleza de la materia y la energía oscura. Ha destacado por sus aportaciones al campo de la cosmología inflacionaria.



Daniel G. Figueroa se doctoró en cosmología teórica en el Instituto de Física Teórica de Madrid en 2010. Tras dos años en la Universidad de Helsinki, actualmente trabaja en el departamento de física teórica de la Universidad de Ginebra. Investiga la conexión entre física de partículas y cosmología.

EN SÍNTESIS

Según la teoría de la inflación cósmica, durante la primera fracción de segundo el universo habría sufrido una fase de expansión exponencial.

Justo después, la energía responsable de ese estiramiento primigenio se habría transformado en toda la materia y radiación que hoy llenan el cosmos.

Dicho proceso de creación de materia y radiación tuvo que emitir una ingente cantidad de ondas gravitacionales.

Esas ondas podrían ser detectadas en un futuro próximo. Su descubrimiento permitiría descifrar la física de los primeros instantes del universo.

NUESTRO CONOCIMIENTO ACTUAL DEL UNIVERSO SE basa en la teoría de la gran explosión. Esta explica la evolución del cosmos desde la primera fracción de segundo después de su nacimiento hasta nuestros días, unos 13.700 millones de años más tarde. Ese primer instante, sin embargo, continúa planteando grandes retos teóricos. ¿Sería posible acceder experimentalmente a él? Por extraordinario que parezca, la respuesta bien podría ser afirmativa.

Hoy sabemos que el origen de nuestro universo se caracterizó por procesos físicos de energías extraordinariamente elevadas. Uno de ellos fue la creación de toda la materia y radiación que contiene el cosmos actual. De acuerdo con la teoría cosmológica más aceptada, la materia no se creó en el mismo instante en que nació el universo, sino una minúscula fracción de segundo después. Ese proceso tuvo lugar de manera tan violenta que debió provocar una ingente emisión de ondas gravitacionales. Desde entonces, esas ondas habrían estado propagándose libremente por el cosmos, portando consigo la información de lo que sucedió en aquel instante.

En una serie de trabajos publicados a lo largo de los últimos años, hemos analizado en detalle varias formas en las que pudo transcurrir la producción primigenia de materia y energía en el universo. Nuestro trabajo nos ha permitido predecir las características de las ondas gravitacionales que se emitieron entonces. Bajo ciertos supuestos, su amplitud y frecuencia se hallarían al alcance de la próxima generación de detectores de ondas gravitacionales. De ser así, ese fondo fósil de radiación gravitatoria nos abriría las puertas a una vía de investigación nunca antes explorada. Los primeros instantes del universo nos serían revelados.

Cabe subrayar que, hasta ahora, la señal cósmica más antigua que hemos sido capaces de detectar es la radiación electromagnética del fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés), la cual fue emitida cuando el universo tenía 380.000 años. Se trata sin duda de una fuente de incalculable valor en la investigación del universo primitivo, pues data de cuando el cosmos apenas tenía el 0,003 por ciento de su edad actual. Sin embargo, palidece en comparación con la posibilidad de observar cómo era el universo justo después de su origen.

LA VERDADERA GRAN EXPLOSIÓN

La teoría de la gran explosión fue propuesta durante el primer tercio del siglo xx. Según su versión moderna, el universo nació hace 13.700 millones de años. En sus inicios, ocupaba un volumen ínfimo y se encontraba en un estado extremadamente denso y caliente. Desde entonces ha venido expandiéndose y enfriándose, en un proceso que, a lo largo de miles de millones de años, ha dado lugar a los átomos, las estrellas y las galaxias que conforman el universo actual.

Dicho modelo de evolución cósmica se apoya en la relatividad general (la teoría moderna de la gravedad, formulada por Albert Einstein en 1915) y en tres hechos empíricos muy robustos: la recesión observada de las galaxias lejanas; la abundancia relativa de elementos químicos ligeros (hidrógeno, helio y litio, creados pocos minutos después de la gran explosión) y la existencia de un fondo cósmico de radiación de microondas. Esa radiación fue emitida en todos los puntos del espacio unos 380.000 años después de la gran explosión. En ese momento, el universo se enfrió lo suficiente como para que electrones y protones pudieran combinarse y formar los primeros átomos neutros. Dado que la radiación electromagnética no interacciona con la materia neutra, a partir de entonces los fotones quedaron libres para propagarse por el espacio y atravesar largas distancias. Dicha radiación, que aún hoy continúa llegando hacia nosotros, constituye la luz más antigua que podemos ver: antes de ser emitida, el universo se encontraba lleno de un plasma de partículas cargadas que, como una niebla impenetrable, dispersaba continuamente la luz. Por tanto, ninguna señal electromagnética anterior a aquella época ha podido sobrevivir hasta nuestros días.

Sin embargo, a pesar de sus éxitos predictivos, la teoría de la gran explosión no explica la extraordinaria homogeneidad, isotropía y planitud (ausencia de curvatura espacial) que exhibe el cosmos actual a gran escala. Todas las observaciones modernas confirman que el universo presenta el mismo aspecto en todo lugar y en toda dirección hacia la que miremos. Para acabar adquiriendo esa tremenda uniformidad, el cosmos primigenio tendría que haber comenzado en un estado sumamente regular y plano desde el principio: unas condiciones muy improbables para las que la teoría no encuentra ninguna justificación. Además, el modelo de la gran explosión tampoco aclara el origen de las fluctuaciones iniciales en la densidad de materia, los «grumos» en la sopa primigenia que hoy sabemos que fueron necesarios para que, miles de millones de años después, se formasen por atracción gravitatoria las galaxias, los cúmulos y los supercúmulos de galaxias. Por último, tampoco sabemos qué mecanismos detonaron la gran explosión.

La teoría de la inflación cósmica fue propuesta hace unos treinta años para resolver esas dificultades. Por inflación entendemos un período muy breve al comienzo del universo en el que una densidad de energía aproximadamente constante habría provocado que el espacio se expandiese a un ritmo exponencial. Se cree que dicha energía se hallaba asociada a cierto campo físico, el inflatón, el cual solo habría existido durante aquellos primeros instantes. Los diferentes modelos estiman que el período inflacionario duró muy poco, entre 10^{-35} y 10^{-10} segundos. Con todo, ese brevísimo lapso de tiempo bastó para que cada dirección del espacio aumentase su tamaño en el increíble factor de 10^{26}, si no más. Las proporciones de aquel estiramiento primigenio fueron tan colosales que toda irregularidad inicial habría quedado «diluida» desde el principio. Así pues, la inflación constituye una hipótesis elegante que, sin necesidad de imponer condiciones iniciales *ad hoc*, explica la casi perfecta homogeneidad, isotropía y planitud del cosmos actual.

Además, según las leyes de la mecánica cuántica, el campo del inflatón no pudo haber sido completamente uniforme. Como todo campo cuántico, debió experimentar pequeñas fluctuaciones aleatorias. Según la teoría de la relatividad general, aquellas fluctuaciones tuvieron que provocar leves distorsiones en la geometría del espaciotiempo, las cuales, dilatadas por la gran expansión, acabaron generando los grumos iniciales en la distribución de materia.

Las huellas de la (verdadera) gran explosión

La teoría de la inflación cósmica postula que, durante su primera fracción de segundo, el universo experimentó una expansión de proporciones descomunales (*amarillo*). Esta fue provocada por la densidad de energía asociada al inflatón, un campo físico de efectos repulsivos que habría llenado el universo primigenio. Durante la inflación, el universo se encontraba frío y «vacío»; después, la misma energía que estiró el espacio se convirtió en toda la materia y la radiación que contiene el cosmos actual. Ese proceso, conocido como recalentamiento (*rojo*), se interpreta hoy como la verdadera gran explosión de la teoría. Tras el recalentamiento, la expansión cósmica continuó a una tasa mucho más moderada (*azul*).

El recalentamiento del universo tuvo lugar de manera tan violenta que debió generar una enorme cantidad de ondas gravitacionales; distorsiones del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Esas ondas viajan aún por el cosmos. Si pudiéramos detectarlas, estaríamos observando cómo era el universo en aquellos instantes.

INFLACIÓN

RECALENTAMIENTO

Formación de los primeros átomos neutros

Universo actual

Fondo cósmico de microondas

Fondo cósmico de ondas gravitacionales

?

10^{-35} - 10^{-10} segundos

380.000 años

Tiempo

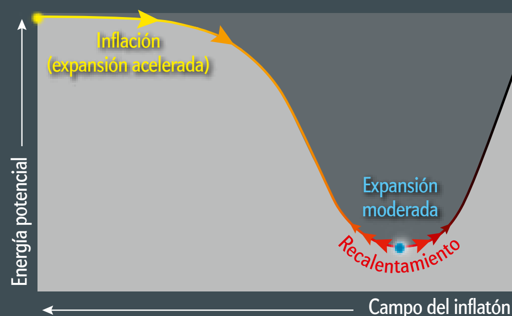
13.700 millones de años

La imagen de un universo joven

Hoy, la señal cósmica más antigua que hemos logrado detectar es la radiación del fondo cósmico de microondas. Esta fue emitida cuando el universo se hizo transparente al paso de la luz, unos 380.000 años después de su nacimiento. Los fotones que fueron liberados entonces (*onda verde*) conforman una «fotografía» fiel del universo primitivo.

Señales del universo primigenio

Las ondas gravitacionales procedentes del recalentamiento fueron emitidas durante la primera fracción de segundo del universo. Su detección revelaría cómo transcurrió el proceso de creación de toda la materia y energía que llenan hoy el universo.



Conversión de la energía inflacionaria en materia

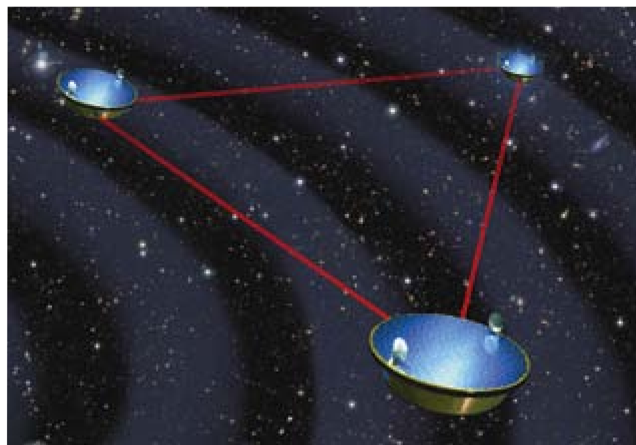
El agente responsable de la rápida expansión inicial del universo fue el inflatón, un campo físico de efectos repulsivos. Su energía potencial puede representarse en una gráfica en función del valor del campo. La región de energía elevada (*meseta amarilla*) se corresponde con el período inflacionario. Después, el inflatón «se deslizó» por la pendiente (*naranja*) para alcanzar su estado de mínima energía (*azul*).

En el proceso, su energía potencial se transformó en materia y radiación. Las oscilaciones en torno al mínimo (*rojo*) se corresponden con el recalentamiento del universo. Al desaparecer la energía inflacionaria inicial, la expansión del universo continuó, pero a un ritmo mucho más lento.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; NASA, WMAP (fondo cósmico de microondas)

La teoría inflacionaria no solo explica de manera cualitativa el origen de esas irregularidades en el espaciotiempo; también predice sus propiedades. En particular, dichas fluctuaciones deberían ser invariantes de escala; es decir, al descomponerlas en sus longitudes de onda características, todas ellas deberían mostrar aproximadamente la misma amplitud. Este patrón, que constituye una predicción muy distintiva de un período de inflación, coincide con el observado en la radiación del fondo cósmico de microondas. Aunque esperaríamos que el CMB fuese uniforme, hoy sabemos que la temperatura de los fotones que lo componen presenta pequeñas anisotropías, del orden de unas pocas partes por cien mil. Dichas variaciones fueron descubiertas en los años noventa por el satélite COBE, de la NASA; un hallazgo que merecería el premio Nobel de Física en 2006. Análisis subsiguientes realizados a comienzos del presente siglo por su sucesor, el satélite WMAP, permitieron confirmar que el espectro de las anisotropías del fondo cósmico de microondas es aproximadamente invariante de escala. Por otro lado, también la distribución cósmica de galaxias obedece al mismo patrón. Las observaciones confirman, por tanto, que el espectro de perturbaciones del espaciotiempo a gran escala se corresponde con el predicho por la teoría inflacionaria.

Por último, si nos preguntamos acerca del origen de la materia y la radiación que hoy existen en el universo, la teoría inflacionaria nos da también una respuesta: procederían de la misma densidad de energía que causó la expansión primordial. Durante la inflación el universo estaba vacío y extremadamente frío, con el inflatón como el único grado de libertad activo. Cuando la expansión exponencial tocó a su fin, la energía potencial del inflatón se convirtió en materia y energía cinética. Dicho proceso se conoce con el nombre de recalentamiento —llamado así por razones históricas, si bien hoy no nos consta que el universo hubiera estado caliente con anterioridad—. Esa violenta conversión de la energía inflacionaria en materia dio lugar a violentas ondas de choque: literalmente, como en una gran colisión. De ahí que el recalentamiento se interprete hoy como la verdadera gran explosión de la teoría original. De hecho, fue durante el recalentamiento del universo cuando se generó la enorme entropía —entendida como grados de libertad independientes— que caracteriza al cosmos actual.



Antenas cósmicas: Las ondas gravitacionales son perturbaciones en el espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Los métodos propuestos para detectarlas se basan en sistemas de espejos con interferómetros láser. El paso de radiación gravitatoria provoca ligeras variaciones en la posición de los espejos, las cuales son amplificadas por los interferómetros. La imagen ilustra el diseño de LISA, un sistema de tres satélites en caída libre proyectado originalmente por la NASA y la ESA.

NASA/ESA

MENSAJEROS SIDERALES

La materia que se creó durante el recalentamiento poseía densidades extremas, se propagaba a velocidades muy cercanas a la de la luz y colisionaba constantemente entre sí. Por tanto, según la teoría de la relatividad general, una fracción considerable de su energía tuvo que convertirse en ondas gravitacionales. Debido a que la interacción gravitatoria es muy débil, dichas ondas se desacoplaron inmediatamente del plasma, por lo que desde entonces habrían estado viajando sin impedimento hacia nosotros. Dado que aquello sucedió a la vez en todos los puntos del espacio, esa radiación gravitatoria debería formar hoy un fondo fósil: un remanente de aquellos primeros instantes que, procedente de todas las direcciones, inundaría todo el universo (de modo análogo a como ocurre con la radiación electromagnética del CMB, pero con la diferencia de que este fue generado cientos de miles de años más tarde).

Las ondas gravitacionales son «arrugas» del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Constituyen una de las predicciones más firmes de la teoría de la relatividad general de Einstein, según la cual se emiten cuando objetos de gran masa alcanzan velocidades cercanas a la de la luz. Así ocurre en los sistemas binarios de agujeros negros, en las explosiones de supernova y en otros fenómenos astrofísicos violentos. De la misma manera que la electrodinámica nos permite calcular el ritmo al que una carga eléctrica oscilante emite radiación electromagnética, la teoría de la relatividad general nos permite calcular la tasa a la que un sistema estelar binario radia energía en forma de ondas gravitacionales. El primer púlsar binario (sistemas formados por dos estrellas de neutrones en rápida rotación) fue descubierto en 1974 por Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor, quienes en 1993 recibirían por ello el premio Nobel. Dicho hallazgo y otros posteriores han permitido confirmar de manera indirecta la existencia de ondas gravitacionales, pues en tales sistemas se observa una pérdida paulatina de energía que coincide, en unas pocas partes por mil, con las predicciones de la relatividad general.

Sin embargo, hasta ahora ningún dispositivo ha logrado detectar ondas gravitacionales de forma directa. La interacción gravitatoria es tan débil que el objetivo plantea enormes dificultades técnicas. A tal fin existen en la actualidad varios proyectos en marcha o en fase de desarrollo. El Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., consta de dos interferómetros láser situados a 3000 kilómetros de distancia y cuyo intervalo de detección cubre desde las decenas de hercio hasta varios kilohercios. De cara al futuro se ha considerado el diseño de interferómetros espaciales, como la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA, un sistema de satélites proyectado originalmente por la NASA y la ESA) o el Observatorio de la Gran Explosión (BBO, con un diseño más futurista), con los que se espera detectar frecuencias más bajas y amplitudes mucho menores. Tales experimentos podrían observar ondas gravitacionales procedentes de fenómenos astrofísicos violentos en un futuro próximo; tal vez a lo largo de la presente década.

Como ocurre en todo proceso ondulatorio, la frecuencia de las ondas gravitacionales depende del sistema físico que las generó. La emisión de ondas gravitacionales durante el recalentamiento del universo fue analizada en 1997 por S. Khlebikov,

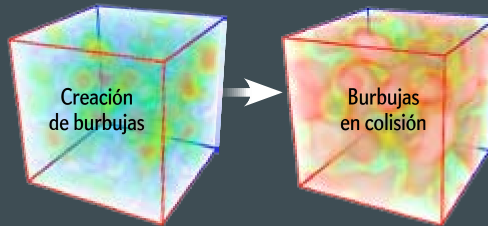
Recalentamiento y ondas gravitacionales

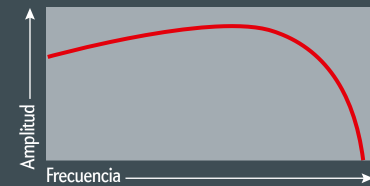
El recalentamiento del universo (la conversión de la energía inflacionaria en materia) fue un fenómeno tan explosivo que debió generar una gran cantidad de ondas gravitacionales. Estas formarían hoy un fondo cósmico «fósil» remanente de aquellos instantes. Sin embargo, desconocemos la naturaleza física del inflatón, por lo que ignoramos en qué clase de campos de materia (escalares, vectoriales o fermiónicos) pudo acabar convirtiéndose.

Mediante cálculos analíticos y simulaciones informáticas, los autores han analizado los principales escenarios posibles y han calculado la impronta que cada uno de ellos debería haber dejado en el fondo cósmico de ondas gravitacionales. Cada escenario produce una señal fácilmente reconocible, por lo que la detección de dicho fondo permitiría descartar familias enteras de modelos inflacionarios y descifrar numerosas incógnitas acerca de la física del cosmos primigenio. A continuación se reproducen dos ejemplos simplificados de modelos de recalentamiento (*izquierda*), así como el espectro de ondas gravitacionales asociado a cada uno (*derecha*).

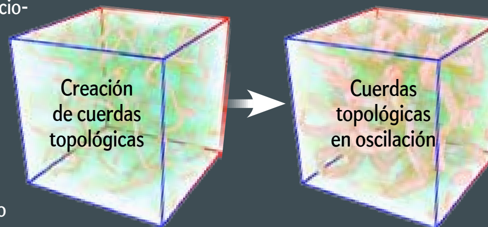
Modelos de recalentamiento | **Espectro de ondas gravitacionales**

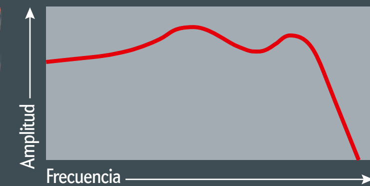
Campos escalares
La producción de campos escalares (partículas de espín cero, como el bosón de Higgs) procede mediante la formación de burbujas de materia. Estas se expanden y acaban colisionando entre sí, tras lo cual se fragmentan y generan un flujo turbulento.





Campos escalares y vectoriales
Al añadir al modelo campos vectoriales (partículas de espín uno, como el fotón), las concentraciones iniciales de energía adoptan la forma de cuerdas topológicas, configuraciones especiales de estructura longitudinal. A medida que transcurre el tiempo, la geometría de dichas cuerdas se va definiendo mejor. La generación y dinámica de estas estructuras genera más ondas gravitacionales, lo que produce un espectro distinto al del caso anterior.





DE: «GRAVITATIONAL WAVES FROM ABELIAN GAUGE FIELDS AND COSMIC STRINGS AT PREHEATING», JEAN-FRANÇOIS DUFAUX, DANIEL G. FIGUEROA Y JUAN GARCÍA-BELLIDO EN *PHYSICAL REVIEW D* 82, 083518, OCTUBRE DE 2010 (*simulaciones y espectros*)

de la Universidad Purdue, y I. Tkachev, de la Universidad estatal de Ohio y el Instituto para la Investigación Nuclear ruso; y, un año después y de manera independiente, por uno de nosotros (García-Bellido). Aquellos trabajos demostraron que las ondas gravitacionales procedentes del recalentamiento del universo podrían estar llegando hoy hasta nosotros con un espectro cuyo pico de frecuencias podría hallarse entre el hercio y el gigahercio.

En caso de detectarlo en un futuro, la forma de reconocer dicho fondo sería a partir de sus características espectrales; es decir, mediante el estudio de la intensidad de cada una de las frecuencias simples que lo componen. En general, el perfil de un espectro ondulatorio codifica los detalles del proceso de emisión de las ondas. Si consideramos el caso del fondo cósmico de microondas, por ejemplo, veremos que su espectro coincide con el de un cuerpo negro (un emisor perfecto) a una temperatura de 2,73 grados Kelvin. Ello se debe a que, en el momento en que fueron liberados, los fotones del CMB se encontraban en equilibrio térmico con el plasma (si bien su temperatura en aquel entonces era unas mil veces superior a la que observamos hoy). Por el contrario, la emisión de ondas gravitacionales durante el recalentamiento tuvo lugar cuando se estaba creando toda la materia y la radiación, en una situación muy alejada del equilibrio térmico. De hecho, su espectro debería asemejarse a uno de tipo turbulento, lo cual debería permitirnos extraer gran cantidad de información sobre aquellos primeros instantes del universo. Sus detalles podrían aportar la clave para entender fenómenos hoy tan misteriosos como la generación de la asimetría entre materia y antimateria, el origen de los campos magnéticos primordiales o incluso el origen de la materia oscura.

MODELOS DE RECALENTAMIENTO

Ignoramos la naturaleza física del inflatón y los pormenores del proceso de recalentamiento. En particular, desconocemos cómo interaccionaba el inflatón con otras especies de materia, por lo que no sabemos a qué clase de campos dio lugar. En principio, la energía inflacionaria pudo haber generado materia de tipo escalar (sin momento angular intrínseco, como el bosón de Higgs), campos vectoriales (como el asociado al fotón o a los bosones W y Z) o materia fermiónica (del mismo tipo que los electrones o los quarks). Pudo incluso haber generado especies que aún no hemos descubierto, las cuales, más tarde, habrían dado lugar a la materia que conocemos. Ignoramos también la escala típica de energías de los fenómenos de física de partículas implicados: por lo que sabemos, la energía característica de aquellos procesos pudo hallarse entre 100 y 10^{15} gigaelectronvoltios.

Sin embargo, sí podemos aventurar ciertas propiedades genéricas del recalentamiento. Cuando terminó la inflación, el campo del inflatón debía constituir un condensado de Bose-Einstein; una configuración caracterizada por que todos los

cuantos que la conforman poseen la misma energía. Ello implica que la conversión de la energía del inflatón en otras especies de materia pudo proceder mediante efectos no perturbativos, fenómenos colectivos muy especiales que permiten que una especie dada pueda transformarse en otras de masa incluso más elevada. Además, dichos procesos ocurren a un ritmo mucho más rápido que los ordinarios, por lo que el inflatón se habría transformado en otras formas de materia a un ritmo exponencial, mediante un proceso explosivo muy violento.

A partir de aquí, podemos calcular las huellas que cada tipo de escenario debería haber dejado en el espectro del fondo cósmico de ondas gravitacionales. La hipótesis más sencilla de desarrollar —no por ello más o menos realista que otras— procede de suponer que el condensado del inflatón interaccionaba solo con materia de tipo escalar. Bajo esta suposición, en un artículo publicado en 2007 consideramos la producción de ondas gravitacionales en varios modelos inflacionarios. Todos ellos comparten la propiedad de que, mediante efectos no perturbativos, el recalentamiento transcurre mediante la formación de grandes burbujas de energía en determinadas regiones del espacio. Dichas burbujas vendrían a ser ondas de materia muy localizadas y dotadas de una gran energía cinética, las cuales se expanden a velocidades próximas a la de la luz y acaban colisionando entre sí. Esos choques las fragmentan y crean nuevas ondas de materia de longitud de onda menor. Al cabo de cierto tiempo, las ondas originales se han esparcido por todo el espacio y se comportan como un fluido turbulento. Todo ello ocurre en una pequeñísima fracción de segundo. Al final, el sistema alcanza el equilibrio térmico; es decir, una temperatura común.

El aspecto de mayor relevancia reside en que los primeros estadios se corresponden con un flujo de materia tan violento que las ondas gravitacionales emitidas poseen una gran amplitud. En un buen número de modelos inflacionarios esa amplitud es de hecho enorme, correspondiente a una millonésima parte de toda la energía disponible; pero, por desgracia, su espectro se encuentra centrado en frecuencias muy superiores a aquellas a las que serán sensibles los detectores de ondas gravitacionales actualmente en construcción. Sin embargo, en nuestro trabajo de 2007 predecimos por primera vez la existencia de un fondo de ondas gravitacionales que podría ser detectado por los próximos sistemas de satélites (en concreto, por BBO y DECIGO, el observatorio de ondas gravitacionales propuesto por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial). Dicho fondo sería observable si el recalentamiento hubiese tenido lugar de acuerdo con cierto modelo inflacionario de baja energía. Poco después, varios grupos confirmaron nuestra predicción teórica y se propusieron nuevos experimentos para detectarlo.

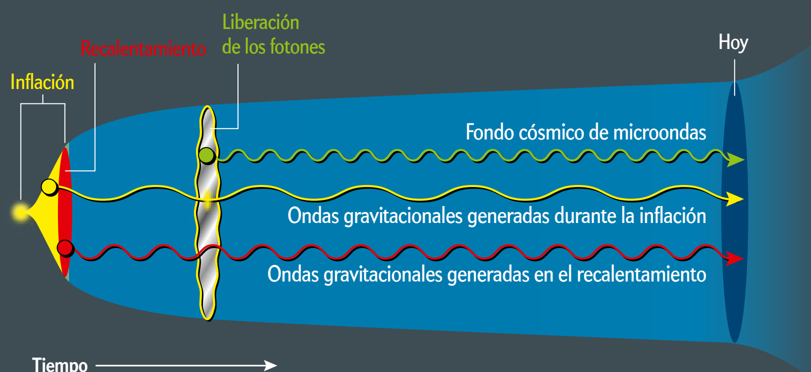
Una pega de la que adolecen los modelos que solo incluyen campos escalares radica en que, a menudo, estos suelen acoplarse a campos vectoriales. Así pues, hace dos años, en colaboración con Jean-François Dufaux, del CNRS francés, extendimos nuestro trabajo a escenarios en los que el inflatón interacciona también con este tipo de campos. Hallamos que, en tales casos, la creación de campos vectoriales procede mediante la aparición de defectos topológicos de tipo cuerda, ciertas configuraciones de energía dotadas de estructura longitudinal. Estas actúan como una nueva fuente de radiación gravitatoria que se suma a la creada por los campos escalares.

El espectro creado por las cuerdas topológicas posee una frecuencia característica determinada por la masa efectiva de los campos vectoriales (la cual, a su vez, establece el grosor de las cuerdas topológicas). Tales escenarios no solo proporcionan modelos más completos, sino que predicen una signatura observacional única: un espectro de ondas gravitacionales con dos máximos locales bien diferenciados, uno debido a la dinámica de los campos escalares y otro originado por las cuerdas topológicas. Desde el punto de vista empírico, esta característica constituye una rúbrica idónea para distinguir dicho modelo de otros. Además, las configuraciones de campos vectoriales son un candidato ideal para dar cuenta de los campos magnéticos primordiales que, más tarde, serían amplificados por mecanismos de tipo dinamo en las galaxias y cúmulos de galaxias hasta generar los campos magnéticos que hoy permean el universo a casi todas las escalas [*véase* «Campos magnéticos cósmicos», por Klaus G. Strassmeier; Investigación y Ciencia, julio de 2010].

FONDOS CÓSMICOS

Otras signaturas del proceso inflacionario

El paradigma inflacionario predice dos fondos de ondas gravitacionales: uno emitido durante el período inflacionario (generado por la rápida expansión del espacio, *amarillo*) y otro posterior, procedente del recalentamiento (debido a la violenta conversión de la energía inflacionaria en materia, *rojo*).

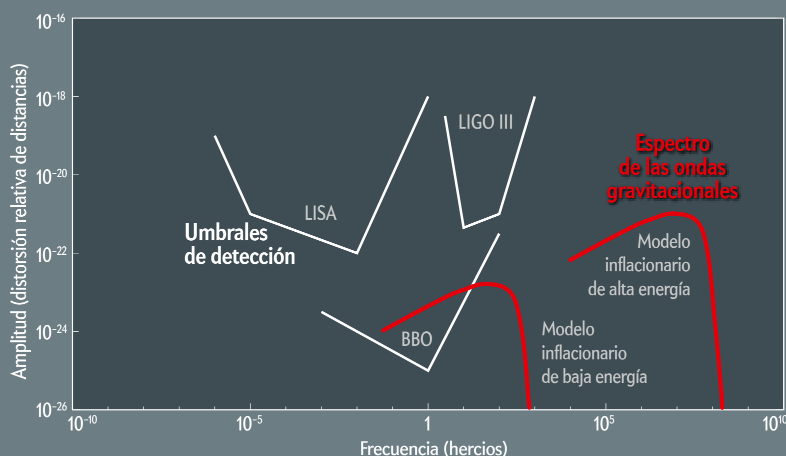


El primero habría dejado su impronta en la polarización de los fotones que componen el fondo cósmico de microondas (*verde*). Con suerte, esta señal podría ser detectada en breve por el satélite Planck, de la ESA. El análisis completo de sus datos se espera para principios de 2013.

Por su parte, las ondas gravitacionales generadas durante el recalentamiento podrían ser detectadas por antenas gravitacionales basadas en interferometría láser. Ambos fondos se diferencian en la amplitud, el intervalo de frecuencias y los detalles de su espectro, lo que permitiría reconocerlos con facilidad.

¿Detección futura?

El fondo de ondas gravitacionales generado durante el recalentamiento tal vez sea observado por la próxima generación de detectores de ondas gravitacionales. Esta gráfica muestra, en función de la frecuencia y la amplitud de las ondas (medida en términos de la distorsión relativa de distancias que provocan), los umbrales de detección de los proyectos LISA, LIGO III y BBO. Ciertos modelos inflacionarios de baja energía predicen una señal que cae dentro del umbral de detección de los futuros observatorios.



DE: «STOCHASTIC BACKGROUND OF GRAVITATIONAL WAVES FROM HYBRID PREHEATING», DANIEL G. FIGUEROA Y JUAN GARCÍA-BELLIDO EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS* 98, 061302, FEBRERO DE 2007

Por último, cabe considerar modelos de recalentamiento en los que la energía inflacionaria da lugar a materia fermiónica. Desde un punto de vista matemático, sin embargo, los fermiones resultan mucho más difíciles de tratar que los campos escalares o vectoriales, motivo por el que hasta la fecha los estudios han sido escasos. Con todo, en un trabajo publicado hace unos meses por uno de nosotros (Figueroa) junto con Kari Enqvist y Tuukka Meriniemi, de la Universidad de Helsinki, calculamos por primera vez la producción de radiación gravitatoria en un modelo de recalentamiento fermiónico. Como consecuencia del principio de exclusión de Pauli, que establece que dos fermiones idénticos nunca pueden ocupar el mismo estado cuántico a la vez, los fermiones son creados por efectos no perturbativos en una configuración energética que crece de manera gradual, denominada esfera de Fermi. La amplitud del fondo de ondas gravitacionales asociado podría tener una amplitud enorme, muy superior a la mínima requerida por los observatorios futuros. Al igual que en los modelos que solo incluyen campos escalares, en la mayoría de los escenarios su espectro se hallaría centrado en frecuencias demasiado elevadas para ser detectadas. Sin embargo, en ciertos modelos inflacionarios de baja energía, las ondas generadas se podrían encontrar dentro de los umbrales de detección de los futuros sistemas BBO y DECIGO.

UNA NUEVA TÉCNICA OBSERVACIONAL

La idea de que el universo experimentó una fase de expansión exponencial durante sus primeros instantes constituye, desde hace treinta años, la hipótesis más robusta para despejar las incógnitas que encierra la teoría de la gran explosión. Todas las observaciones recientes, tanto las referentes a la distribución de materia en el universo a gran escala como las relativas a la radiación del fondo cósmico de microondas, no han hecho sino confirmar las predicciones de la teoría inflacionaria. No obstante, todavía no disponemos de una prueba irrefutable del período de inflación. De hecho, a pesar de su amplia aceptación entre la comunidad científica, algunos reconocidos cosmólogos muestran también su escepticismo [*véase* «La inflación a debate», por Paul J. Steinhardt; Investigación y Ciencia, junio de 2011].

La búsqueda de ondas gravitacionales procedentes del recalentamiento del universo podría cubrir ese hueco. Si algún proceso de tipo inflacionario tuvo efectivamente lugar, buena parte de sus características habrían quedado codificadas en el espectro energético de dicha radiación gravitatoria. Su detección nos permitiría descartar familias enteras de modelos inflacionarios e incluso inferir numerosas características sobre el modelo de física de altas energías que regía en aquellos primeros instantes del universo. Sin duda, merece la pena investigar con mayor detalle la información contenida en las propiedades espectrales de esta reliquia cósmica.

Nuestras posibilidades de éxito dependerán de la capacidad de los futuros detectores. Estos se basan en grandes espejos en suspensión (en caída libre en el caso de LISA), cuya distancia mutua experimenta una modulación periódica como consecuencia de las distorsiones provocadas por el paso de una onda gravitacional. Gracias a interferómetros láser, el efecto es amplificado y detectado como una señal sobre un fondo de ruido. Los detectores actuales más sensibles, como los de LIGO, pueden distinguir distorsiones de una parte en 10^{21}; es decir, son sensibles a diferencias de distancias mil veces menores que un núcleo atómico. En un futuro próximo se espera lograr una capacidad de detección mil veces mayor. Ello podría bastar para observar las ondas gravitacionales generadas durante el recalentamiento.

La detección directa de ondas gravitacionales constituye uno de los mayores retos a los que se enfrenta la comunidad científica en estos momentos. Su logro supondría un avance comparable a la revolución que experimentó la astronomía con la apertura de las sucesivas ventanas observacionales a las ondas de radio, la radiación infrarroja o ultravioleta, o a los rayos X y gamma. Creemos que no debemos perder esta oportunidad para mirar atrás en el tiempo y descifrar la física que caracterizó los orígenes de nuestro universo.

PARA SABER MÁS

El universo inflacionario. Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt en *Investigación y Ciencia* n.º 94, julio de 1984.

El universo inflacionario autorregenerante. Andrei Linde en *Investigación y Ciencia* n.º 220, enero de 1995.

La detección de las ondas gravitatorias. Peter S. Shawhan en *Investigación y Ciencia* n.º 349, octubre de 2005.

A stochastic background of gravitational waves from hybrid preheating. Juan García-Bellido y Daniel G. Figueroa en *Physical Review Letters*, vol. 98, 061302, febrero de 2007. Disponible en **arxiv.org/astro-ph/0701014**.

Gravitational waves from abelian gauge fields and cosmic strings at preheating. Jean-François Dufaux, Daniel G. Figueroa y Juan García-Bellido en *Physical Review D* 82, 083518, octubre de 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/1006.0217**.

Stochastic background of gravitational waves from fermions. Kari Enqvist, Daniel G. Figueroa y Tuukka Meriniemi en *Physical Review D* 86, 061301, septiembre de 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/1203.4943**.

NEUROBIOLOGÍA

Cerebros en miniatura

El modo en que las especies de menor tamaño resuelven el problema de alojar y mantener un cerebro voluminoso arroja nueva luz sobre la evolución del sistema nervioso

William G. Eberhard y William T. Wcislo

El nemátodo *Caenorhabditis elegans* posee un sistema nervioso que es una maravilla de la miniaturización. Su cuerpo, de 1 milímetro de longitud, alberga solo 302 neuronas. Pero esa red neuronal reducida ejecuta una gama amplia de comportamientos. (Imagen obtenida tras la tinción de las proteínas de tipo histona y las membranas celulares.)

CORTESÍA DE IAN D. CHIN-SANG, UNIVERSIDAD DE QUEENS, KINGSTON, ONTARIO/*AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE*

Un hecho básico en el mundo animal es que el tamaño del cerebro depende en cierta medida del tamaño corporal. Una larga historia de estudios en vertebrados ha demostrado que la relación entre cerebro y masa corporal sigue una función potencial. Los individuos más pequeños poseen cerebros grandes con respecto al tamaño de su cuerpo. Esta relación de escala fue popularizada como «regla de Haller» por el biólogo evolutivo Bernhard Rensch en 1948, en honor a Albrecht von Haller, quien la describió hace unos 250 años. Muy poco se sabe sobre el tamaño relativo del cerebro en invertebrados tales como insectos, arañas y nemátodos, a pesar de que estos grupos figuran entre los más diversos y abundantes de la Tierra. Con todo, una serie de estudios recientes realizados en invertebrados confirma que la regla de Haller se cumple también en ellos, incluso se extiende a tamaños corporales mucho menores de lo que antes se pensaba.

EN SÍNTESIS

El tamaño del cerebro de una especie depende del tamaño de su cuerpo, una relación de escala que se ha comprobado desde hace tiempo en los animales vertebrados y se ha confirmado hace poco en los invertebrados.

Los animales más pequeños poseen cerebros grandes con respecto a su tamaño corporal, lo que les ha obligado a desarrollar una serie de adaptaciones anatómicas, fisiológicas y ecológicas para hacer frente a las restricciones que ello supone.

A pesar de esas limitaciones, los datos recientes ponen en entredicho la idea de que los animales más diminutos, con una masa cerebral muy reducida, poseen habilidades conductuales y capacidades mentales menos complejas que los animales de mayor tamaño.

Los animales más diminutos han logrado modificar sus patrones alométricos (como la relación entre el tamaño del cerebro y del cuerpo) con respecto a los de vertebrados y otros invertebrados. Las especies que siguen un determinado patrón pertenecen a un mismo grado, y los cambios de un grado a otro se conocen como desplazamientos de grado. El resultado es que diferentes grupos taxonómicos presentan distintas versiones, o variantes, de la regla de Haller.

Los mecanismos responsables de los desplazamientos de grado apenas se están comenzando a comprender. Pero esa combinación de generalidad y variabilidad en la regla de Haller parece poner en tela de juicio la supuesta uniformidad entre animales en el funcionamiento del sistema nervioso central. También ha permitido conocer los retos a los que se enfrentan los organismos diminutos. El tejido neural conlleva un elevado coste metabólico, mayor aún en los animales minúsculos porque poseen un cerebro proporcionalmente más grande. Los animales podrían recurrir a distintas soluciones para ahorrar costes, como adoptar un modo de vida o conducta menos exigentes. Sin embargo, los datos disponibles indican que al menos algunos animales de cuerpo pequeño exhiben los mismos comportamientos que sus parientes de gran tamaño.

Los biólogos han tendido a ignorar los límites mínimos de tamaño corporal y los procesos fisiológicos asociados a la evolución de una menor masa cerebral. En su lugar, se han centrado en el incremento del tamaño del cerebro y las posibles repercusiones en la inteligencia y otros procesos mentales [*véase* «Física de la inteligencia», por D. Fox; en Investigación y Ciencia, septiembre de 2011]. Además, casi todos los datos han sido obtenidos en adultos. Pero los problemas asociados a las demandas de un sistema nervioso voluminoso en un animal pequeño no se limitan a los taxones con adultos miniaturizados. Numerosas especies tienen fases juveniles extremadamente pequeñas que son de vida libre, cuyo crecimiento y supervivencia dependen de sus capacidades conductuales.

Los nuevos datos sobre la alometría del cerebro en invertebrados entrañan consecuencias importantes. Ponen en cuestión las hipótesis propuestas para explicar la regla de Haller, basadas en vertebrados, que invocan factores como la relación entre volumen y superficie, la longevidad y las tasas metabólicas. También ponen en duda la idea, de nuevo fundamentada en vertebrados, de que los animales con cerebros grandes, en términos relativos y absolutos, poseen habilidades conductuales y capacidades mentales más complejas. Por todo ello, consideramos oportuno explorar la organización del sistema nervioso central a escalas muy pequeñas, donde se halla sometido a unas limitaciones diferentes de las de los organismos de gran tamaño.

LOS PROBLEMAS DE LA MINIATURIZACIÓN

Al centrarse en el aumento del tamaño cerebral a lo largo de la evolución, los biólogos han tendido a pasar por alto un problema básico que se deriva de la regla de Haller: ¿dónde puede ubicarse un cerebro relativamente grande en un cuerpo reducido? En salamandras y peces, por ejemplo, el órgano se aloja en una cavidad formada por los huesos del cráneo. En formas miniaturizadas, algunos de esos huesos se han perdido o reducido, lo que ha permitido dar cabida a un cerebro más voluminoso. Los artrópodos poseen un esqueleto externo que puede deformarse para crear más espacio interno. Un juvenil de la araña tejedora *Anapisona simoni*, con una masa corporal de menos de 0,005 miligramos, a simple vista parece una mota de polvo. Casi el 80 por ciento de su cefalotórax está ocupado por el cerebro. Para


William G. Eberhard es profesor de biología en la Universidad de Costa Rica e investigador del Instituto Smithsoniano de Investigación Tropical (STRI) en Panamá. Ha estudiado la biología de artrópodos tropicales durante más de 40 años.

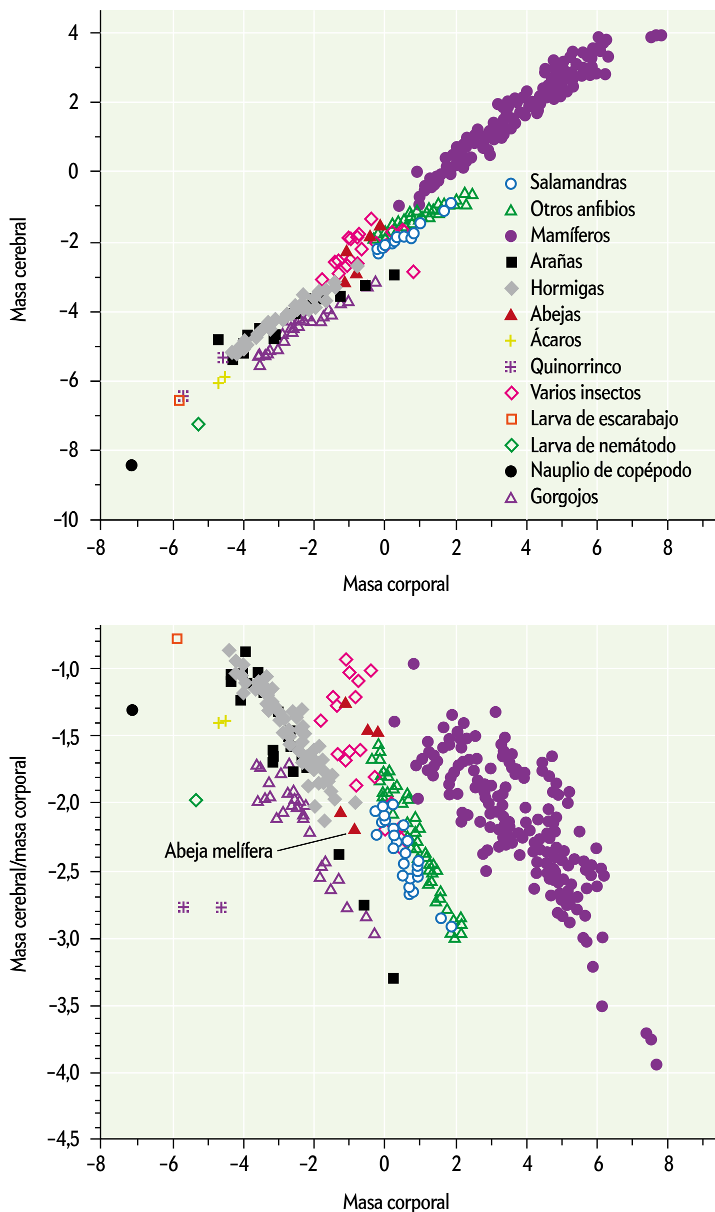

William T. Wcislo es investigador del STRI y ha realizado estudios sobre insectos tropicales durante más de 25 años.

albergar ese enorme órgano, las arañas más pequeñas presentan un conspicuo saliente esternal que aumenta el volumen interno del cefalotórax, donde se aloja el tejido cerebral. En algunas especies de arañas y ácaros, el cerebro ocupa tanto espacio que se desborda hacia las patas, lo que da un nuevo sentido a la expresión «pensar con los pies».

En general, no se han identificado las compensaciones anatómicas que resultan del desplazamiento de otros tejidos, ni tampoco se han determinado los costes. A veces, los cambios de diseño implican que algunas características deben ser sacrificadas con el fin de alojar un sistema nervioso central voluminoso, lo cual puede resultar importante a la hora de establecer los límites inferiores del tamaño corporal en un taxón. Un diminuto escarabajo encapuchado (*Sericoderus*, de la familia Corylophidae), por ejemplo, posee menos músculos en la cabeza y en el tórax que sus parientes de mayores dimensiones. El cerebro agrandado del juvenil de la araña saltadora *Phidippus clarus* se mantiene a costa de reducir el espacio de los divertículos del sistema digestivo.

Otra estrategia para resolver las restricciones de espacio consistiría en reducir el tamaño de las neuronas, con lo que disminuiría el tamaño del cerebro a la vez que se mantendría el número de neuronas y el grado de conectividad entre ellas. No obstante, los escasos datos disponibles sugieren que tales ajustes son incompletos y que, dentro de un taxón, los animales más pequeños suelen presentar un menor número de neuronas. Las neuronas pueden contraerse, pero solo hasta cierto punto. El premio Nobel de física Richard Feynman debatió sobre las limitaciones relacionadas con el almacenamiento y recuperación de información a escalas muy pequeñas; llegó a la conclusión de que «hay mucho sitio al fondo» cuando se construyen sistemas artificiales de procesamiento de la información a nivel de nanoescala. En biología, sin embargo, el «fondo» de los sistemas de procesamiento de la información basados en neuronas tiene un tamaño que solo serviría como punto de partida a Feynman. Existe un límite físico teórico para el diámetro funcional de un axón (unas 0,1 micras). Por debajo de ese valor, ya no puede transmitir información de manera fiable porque la señal es enmascarada por el ruido producido por la despolarización espontánea de las membranas. Además, el tamaño mínimo del cuerpo celular de una neurona está restringido por el tamaño de su núcleo, y este a su vez, por el del genoma de la especie.

El núcleo constituye hasta un 80 o 90 por ciento del volumen del soma celular de las neuronas en los insectos diminutos. Una estrategia de miniaturización consistiría en suprimir cromosomas, empaquetar aún más la cromatina o eliminar el núcleo, lo que daría lugar a neuronas más pequeñas. Dichas modificaciones se han descrito en vertebrados, pero no se conocían en in-



Los animales más pequeños poseen cerebros grandes con respecto al tamaño del cuerpo. Entre ambos tamaños se establece una relación de escala conocida como regla de Haller, comprobada desde hace tiempo entre vertebrados y recién confirmada en invertebrados. En las gráficas se muestran las comparaciones más completas de que se dispone entre ambos parámetros en animales con un rango de tamaños que abarcan 15 órdenes de magnitud. Se representa la relación entre la masa cerebral y la masa corporal en los distintos grupos (*arriba*), y la relación entre la fracción de la masa corporal total que se dedica al cerebro y la masa corporal (*abajo*). En este último caso se observa la magnitud de los desplazamientos de grado entre taxones. (Valores expresados en escala logarítmica.)

FUENTES: DE *PRINCIPLES OF BRAIN EVOLUTION*, POR GEORG STRIEDTER, 2005 (*datos de vertebrados*); DE *ADVANCES IN INSECT PHYSIOLOGY*, 2011 (*datos de invertebrados*); *AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE* (*gráficas*)

vertebrados hasta hace poco. Alexy Polilov, de la Universidad Lomonosov de Moscú, ha demostrado que la mayoría de las neuronas de las diminutas avispas parásitas *Megaphragma* sp. (Trichogrammatidae), con tamaños corporales de entre 170 y 200 micras, carecen de núcleo. El sistema nervioso central de la pupa posee unos 7400 núcleos, pero casi al final de su desarrollo, gran parte de los somas neuronales se rompen, o lisan, y pierden el núcleo. Así, el sistema nervioso del adulto presenta unas 7000 células sin núcleo y entre 339 y 372 células con núcleo, de las cuales solo entre 179 y 253 se ubican en el cerebro.

Algunos cambios volumétricos en el sistema nervioso se asocian también a procesos de lisis. El volumen del cerebro de la pupa, de unas 93.600 micras cúbicas, disminuye hasta 52.200 micras en el adulto. Además, la cutícula de la parte posterior de la cabeza, el área occipital, presenta numerosos pliegues, con lo que se reduce el tamaño de la cápsula cefálica en esa área. Cabe destacar que el sistema nervioso central de *Megaphragma mymaripenne* cuenta con muchas menos neuronas que otros insectos voladores, como las moscas domésticas, con 340.000 neuronas. A pesar de las modificaciones extremas del sistema nervioso, las avispas *Megaphragma* exhiben comportamientos complejos, como la cópula, el vuelo y la búsqueda y reconocimiento de hospedadores, aunque estos no se han estudiado con detalle. No se conocen los mecanismos compensatorios que permiten esas conductas con un número tan bajo de neuronas, la mayoría de ellas anucleadas.

EL PRECIO DE MANTENER EL CEREBRO

Desde un punto de vista energético, el cerebro cuesta más de mantener que la mayoría de los otros tejidos. Los humanos, por ejemplo, poseemos un cerebro que representa poco más del 2 por ciento de nuestra biomasa, pero consume más del 15 por ciento de nuestra energía metabólica basal. Además, para realizar una misma operación, un cerebro reducido exhibe una densidad de procesamiento de información superior a la de un cerebro grande, con lo que el proceso resulta más costoso en términos unitarios. Esas diferencias implican que la selección natural a favor de la eficiencia energética actúa con mayor fuerza sobre las especies pequeñas que sobre las grandes. También plantean la cuestión de cómo pagan ese elevado coste energético los animales diminutos.

Con respecto al procesamiento de la información, los animales pueden adoptar varias estrategias para reducir los costes. Una, la de limitar el tamaño, significa reducir los tipos de conductas y, por consiguiente, la cantidad de tejido neural necesario para sostenerlas. Otra opción consiste en poseer un cerebro enorme, lo cual implica mantener distintos comportamientos y asumir los altos costes metabólicos de un sistema nervioso central agrandado. Por último, se podría optar por una economía en el diseño, basada en modificar las propiedades de las neuronas y de las redes neuronales con el fin de ampliar los comportamientos por unidad de tejido nervioso. Esta última opción permitiría a los animales pequeños exhibir conductas equiparables a las de los grandes sin tener que invertir en sistemas nerviosos enormes.

Hay varias formas en que los animales adoptan una economía en el diseño y reducen la energía destinada al cerebro. Todos cuentan con receptores sensoriales que se ajustan a estímulos específicos con el fin de mejorar la eficiencia. También existen filtros que se sirven de las propiedades mecánicas de sensores y estímulos para reducir los gastos de procesamiento

en el receptor y a niveles superiores del sistema nervioso central. Numerosos insectos, por ejemplo, son muy sensibles a la luz polarizada, un rasgo asociado con la alineación de las moléculas de rodopsina en las microvellosidades de las membranas de los fotorreceptores. Existen otras posibilidades para reducir los costes del sistema nervioso central, como la transmisión analógica y la gradación de las despolarizaciones, que funcionan a distancias pequeñas y con mayor eficiencia energética que los potenciales de acción utilizados por muchos animales para la comunicación entre neuronas. Otra estrategia consiste en emplear las mismas neuronas para múltiples tareas, tanto en funciones sensoriales como motoras, algo habitual en los nemátodos. La neuromodulación resulta frecuente en los animales pequeños. En ella se modifican los efectos de un circuito neuronal al exponerlo a ambientes químicos diferentes, lo que da lugar a comportamientos distintos. Los nemátodos utilizan placas musculares que permiten que un único proceso sináptico estimule varios músculos. Cabe mencionar aún otras estrategias: el control indirecto de los cilios a través de los músculos; la reducción del número relativo de interneuronas, que transmiten señales de una neurona a otra, en oposición a las neuronas motoras y sensoriales, y la reorganización espacial de las neuronas y de las conexiones con el fin de minimizar la longitud total de axones y dendritas. Esta última táctica puede compararse con la que realiza un arquitecto cuando reduce al mínimo la longitud de los cables necesarios para proporcionar electricidad a un edificio. El sistema nervioso del nemátodo *Caenorhabditis elegans* se considera un diseño óptimo, desde este punto de vista de ahorro en hilos conductores. También la tendencia hacia la fusión de los diferentes ganglios del sistema nervioso central de los insectos más diminutos guarda relación con esa eficiencia. Se desconoce la frecuencia de los rasgos de ese diseño en los animales grandes en comparación con los pequeños.

Otras singularidades de los sistemas nerviosos reducidos atañen a las propias neuronas. Al menos en algunos grupos, las dendritas de las células más pequeñas son a su vez más pequeñas y al parecer más simples. Hace casi un siglo, el neuroanatomista Santiago Ramón y Cajal protagonizó una serie de estudios pioneros —y muy bellos— sobre el sistema nervioso de los insectos. Observó que las neuronas de los insectos eran más complejas que las de los vertebrados. Le gustaba referirse a la neuroanatomía de un insecto como un «finísimo reloj de bolsillo», en contraposición al «viejo reloj de pie del abuelo», correspondiente a un vertebrado. La importancia funcional de esas diferencias neuroanatómicas no se conoce en profundidad, pero creemos que constituyen puntos de partida prometedores para futuras investigaciones.

La economía en el diseño también podría darse a nivel de comportamiento, pero ese aspecto ha sido aún menos estudiado. Los ingenieros en robótica incorporan rasgos de diseño conductuales para reducir al mínimo los estímulos que generan información sobre el mundo exterior, con el fin de obtener la respuesta deseada. Una jerarquía rígida de subrutinas conductuales sencillas facilitaría un comportamiento concreto, si estas se ordenan secuencialmente para maximizar la acción motora deseada por bit de estímulo sensorial. Por ejemplo, atrapar un objeto que se va posicionando al azar es una tarea difícil que requiere una serie de transformaciones de estímulos visuales en acciones motoras. En un robot esa tarea se vuelve más fácil si ejecuta una subrutina para girarse y encarar el objeto, lo que desencadena una segunda subrutina para desplazarse a una distancia determinada del mismo. Atrapar el objeto desde una distancia y una dirección dadas simplifica la tarea. Por lo que sabemos, la posibilidad de que los animales pequeños tiendan a utilizar esos diseños de comportamiento no se ha explorado nunca.

EL DESPLAZAMIENTO DE GRADO

Los desplazamientos de grado corresponden a un aumento o disminución en los coeficientes y potencias de las relaciones de escala entre el tamaño del cerebro y el del cuerpo en diferentes taxones. Se conoce poco sobre las transiciones evolutivas entre grados. Sin embargo, resultan cruciales para comprender cómo funcionan los sistemas nerviosos y cómo ha evolucionado la amplia gama de tamaños corporales en los animales. La mayor parte de las discusiones previas sobre ese tema han hecho hincapié en las transiciones evolutivas hacia un cuerpo más grande y hacia formas muy encefalizadas, tal vez debido a la posibilidad fascinante de que ello conllevara una mayor inteligencia. Los nuevos datos obtenidos en invertebrados resaltan los cambios evolutivos en la dirección opuesta —hacia la miniaturización— y los problemas de diseño del sistema nervioso en un cuerpo diminuto. Un desplazamiento de grado pudo haber facilitado la evolución de los tamaños corporales pequeños, más que si los animales hubiesen mantenido una relación cuerpo-cerebro de grados anteriores. Por ejemplo, si un animal que pesa 1 miligramo siguiese la regla de escala de las salamandras, tendría un cerebro que representaría un 20 por ciento de su cuerpo, una proporción exagerada para cualquier animal. Los desplazamientos de grado sugieren que los taxones de reducidas dimensiones, como las hormigas, han resuelto problemas de escalado que parecerían insuperables para animales más voluminosos, aunque se desconoce cómo y por qué lo han hecho.

Los cambios de diseño que se asocian a la mayoría de los desplazamientos de grado aún están por estudiar, pero tal vez





Estas telas fueron construidas por dos arañas tejedoras, *Allocyclosa* (*izquierda*) y *Anapisona* (*arriba*), con distintos tamaños corporales. Las mediciones realizadas en las telas demuestran que las arañas muy pequeñas, con cerebros minúsculos, construyen las telas con una precisión similar a la de las arañas grandes.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

guarden relación con la evolución de nuevos mecanismos de diseño neural. Ello puede ilustrarse si se comparan dos grupos muy diferentes, los nemátodos, con una mísera dotación neuronal, y los vertebrados, con una dotación exagerada. El sistema nervioso del nemátodo *C. elegans* tiene solo 302 neuronas; otros nemátodos y pequeños invertebrados poseen aún menos. Cada neurona de *C. elegans* presenta solo unas 25 sinapsis, y las células están conectadas de forma uniforme y simple.

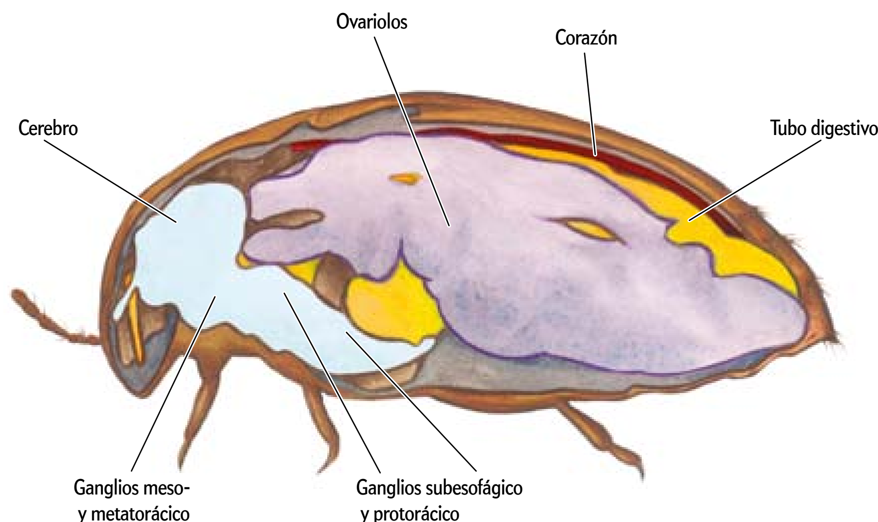
El contraste entre el cerebro de un nemátodo y el de un humano difícilmente puede ser mayor. Nuestro cerebro presenta una cifra astronómica de neuronas (unos 85.000 millones), un número enorme de sinapsis por neurona (por ejemplo, unas 10.000 por cada célula piramidal de la corteza) y niveles de conectividad muy altos. Solo en la corteza humana existen unos $10^{1.000.000}$ circuitos posibles, lo que llevó al premio nóbel Gerald Edelman a describir el cerebro humano como «la selva en la cabeza». El funcionamiento de nuestro cerebro depende más de las poblaciones de neuronas (de los patrones de actividad de grupos de neuronas interconectadas de forma recurrente) que de la actividad de las células individuales. La actividad por separado de una neurona no es ni coherente ni útil en el tratamiento de la información, mientras que de diferentes subconjuntos de la población neuronal pueden surgir distintos patrones de actividad neuronal [*véase* «El lenguaje del cerebro», por T. Sejnowski y T. Delbruck, *en este mismo número*]. Una disfunción en una neurona, por tanto, puede resultar intrascendente para un vertebrado, pero catastrófica para un nemátodo. La pérdida de cierta neurona en *C. elegans*, por ejemplo, reduce a cero su eficacia biológica, ya que incapacita la puesta de huevos en las hembras.

La observación de los circuitos de un chip de ordenador y de las fibras del cordón nervioso ventral de un nemátodo, con un número fijo de neuronas conectadas de manera invariable, nos hace percatar de su asombrosa semejanza. Esa estructura contrasta con el sistema nervioso de un vertebrado, que posee un diseño diametralmente opuesto al de un ordenador. Los procesos de desarrollo de ambos sistemas también son muy diferentes. El de los vertebrados se caracteriza por una producción excesiva de neuronas en etapas jóvenes, seguida de una eliminación selectiva de neuronas y sinapsis. El grado de destrucción de neuronas durante el desarrollo varía entre especies y dentro de cada una de ellas. Así, el porcentaje de células ganglionares de la retina eliminadas es del 80 por ciento en los gatos, entre el 60 y 70 por ciento en las ratas, ratones, macacos rhesus y humanos, y el 40 por ciento en aves y anfibios. En cambio, tal destrucción es casi inexistente en los nemátodos: en *C. elegans*, se descartan ocho neuronas, siempre las mismas, de un total de 310, es decir, un 2,6 por ciento. De modo similar, el segundo estadio juvenil y el adulto de la araña tejedora *Argiope aurantia* cuentan casi con el mismo número de neuronas, a pesar del volumen 24 veces superior del adulto. Tales contrastes hacen pensar que el funcionamiento del sistema nervioso varía mucho entre los distintos grupos del reino animal, en oposición a la homogeneidad que hallamos en la bioquímica, la genética molecular y el desarrollo molecular. El diseño tan austero de los nemátodos representaría una adaptación que permitió la evolución de un tamaño corporal miniaturizado.

GRADOS Y COMPORTAMIENTO

La suposición común derivada de los vertebrados —que los animales de grados inferiores poseen menos capacidades conductuales— no está bien respaldada por los hechos. En los adultos de las arañas tejedoras, cuya masa corporal puede variar hasta un factor de 400.000, no existen datos que demuestren un rendimiento inferior en cuanto a la construcción de la tela. Igual sucede si se comparan abejas de la miel y salamandras. Las salamandras más pequeñas y las abejas tienen aproximadamente el mismo tamaño corporal, pero las abejas se sitúan en un patrón alométrico inferior al de las salamandras. Sin embargo, una abeja es capaz de proezas tales como orientarse utilizando puntos de referencia físicos y la luz polarizada del sol; aprender pautas complejas que implican diferentes modalidades sensoriales o conceptos generales (como diferente/similar o encima/debajo), y usar un lenguaje para comunicar a sus compañeras de colmena dónde encontrar comida. Sería difícil defender el argumento de que el comportamiento de una abeja es inferior al de una pequeña salamandra.

Incluso los nemátodos, de neuroanatomía simple, muestran conductas no muy diferentes a las de numerosos animales con muchas más neuronas. *C. elegans* detecta y responde a diversos estímulos, como el contacto físico con objetos, y percibe diversas sustancias, concentraciones de oxígeno, osmolaridad, *p*H, temperatura, luz y feromonas. Esos estímulos se utilizan para coordinar respuestas motoras y para evaluar condiciones tales como la densidad y el sexo de congéneres. Las respuestas motoras consisten en diferentes movimientos para nadar y arrastrarse sobre una superficie, para invertir esos movimientos o para alterarlos a intervalos fijos de tiempo. Esos animales se orientan y se acercan o alejan de ciertos estímulos; forrajean, engullen la comida, realizan movimientos de deglución y defecan; buscan pareja, copulan y ponen huevos. Además, los



Para acomodar un sistema nervioso central grande en un cuerpo pequeño, los invertebrados deben realizar compensaciones anatómicas. En el adulto del escarabajo encapuchado (*Sericoderus lateralis*), el cerebro se ha trasladado casi en su totalidad de la cabeza al protórax, desplazando otras estructuras.

ADAPTADO DE «MINIATURIZATION EFFECTS IN LARVAE AND ADULTS OF *MIKADO* SP., ONE OF THE SMALLEST FREE-LIVING INSECTS» POR ALEXY POLILOV Y ROLF BEUTEL EN *ARTHROPOD STRUCTURE AND DEVELOPMENT*, VOL. 38, PÁGS. 247-270, 2010; EMMA SKURNICK (*ilustración*)/*AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE*

nemátodos aprenden a modificar una serie de comportamientos motores a partir de la experiencia.

¿CÓMO VALORAR EL COMPORTAMIENTO?

La idea de que los desplazamientos de grado se asocian a diferencias en la capacidad conductual entre especies se basa en la suposición de que el tamaño cerebral y la capacidad conductual se hallan correlacionados. Los estudios comparativos han resultado a menudo confusos debido al uso de parámetros de comportamiento imprecisos y difíciles de definir, como la inteligencia. Entretanto, una pregunta importante sigue sin respuesta: ¿cómo podemos cuantificar y comparar el comportamiento en diferentes taxones? El volumen del repertorio de conductas de un animal se ha utilizado a veces como medida cuantitativa de la complejidad de su comportamiento. Sin embargo, esa idea intuitivamente atractiva adolece de varios inconvenientes. En un estudio realizado con hormigas, Blaine Cole, actualmente en la Universidad de Houston, destacó algunos de ellos. El parámetro se basa en decisiones subjetivas para distinguir entre comportamientos y presenta un problema habitual en los sistemas artificiales de clasificación. Los observadores con un talante «fragmentador» reconocerán un mayor número de comportamientos que los «aglutinadores». Además, las comparaciones de repertorio se basan en varias suposiciones no verificadas: que cada comportamiento es igualmente exigente en términos de procesamiento neural; que las conductas que se denominan del mismo modo en diferentes especies son igualmente exigentes, y que los comportamientos raros, que suelen pasar más inadvertidos al observador, no influyen en la evolución del cerebro. Asimismo, se supone que la velocidad y la precisión con la que se realiza una conducta dada son las mismas en distintas especies, y que las influencias ambientales que modulan el comportamiento resultan mínimas. También se realiza el improbable supuesto de que las colonias de laboratorio revelan la totalidad de las conductas importantes.

Esos problemas han llevado a algunos investigadores a adoptar otros parámetros, tales como la frecuencia de errores en la toma de decisiones, o el grado de precisión al ajustar el comportamiento a otras variables. Esos rasgos pueden compararse de forma más uniforme entre diversas especies. Se ha planteado la hipótesis de que la precisión del comportamiento (la capacidad de repetir un comportamiento de modo exacto e invariable) está menos desarrollada en animales de cerebro pequeño. Estos pueden cometer errores o imprecisiones de varias maneras. Por un lado, al poseer menos receptores sensoriales, reciben menos estímulos y, por tanto, disponen de una información del entorno menos fiable. Además, realizan un procesamiento menos exhaustivo de los estímulos, ya que cuentan con un reducido número de interneuronas o dendritas. Las respuestas motoras o de coordinación entre los diferentes apéndices pueden verse afectadas por la escasa retroalimentación de los proprioceptores (los sensores de los estímulos del interior del cuerpo) o por el aumento de ruido de fondo del sistema nervioso.

Los datos disponibles sobre las más diminutas arañas tejedoras no indican limitaciones conductuales y no confirman la hipótesis de la limitación del tamaño. Esos animales exhiben modificaciones morfológicas para albergar un cerebro agrandado, lo que indica que han desarrollado estrategias concordan-

El neuroanatomista Santiago Ramón y Cajal, galardonado con el premio Nobel, produjo estudios pioneros, muy bellos, sobre el sistema nervioso de los insectos. En este elegante esquema de 1915 se ilustra la compleja anatomía de las neuronas en la retina y el lóbulo óptico de la abeja.

DE TRABAJOS DEL LABORATORIO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS, UNIVERSIDAD DE MADRID/AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE

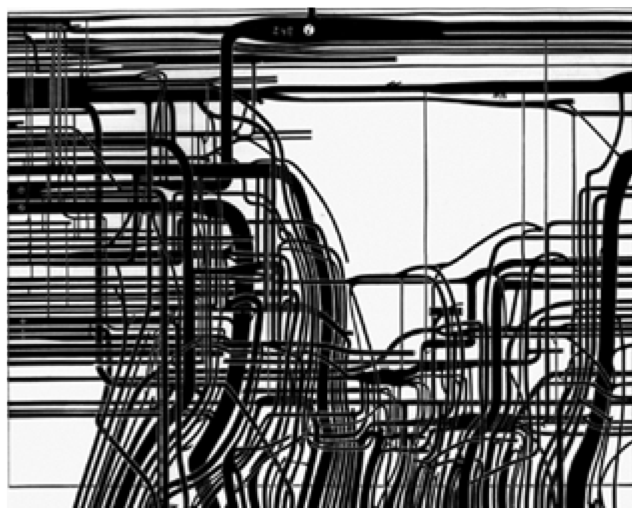
tes con la opción de poseer un tamaño cerebral enorme, según se ha descrito antes. Sin embargo, desconocemos el alcance de esta observación debido a la falta de datos comparativos. Tampoco se han comparado a fondo otras conductas en arañas y otros pequeños animales. Un rasgo que podría estudiarse en diferentes especies y del que podrían obtenerse resultados relevantes es la capacidad para aprender y recordar distintos tipos de experiencias.

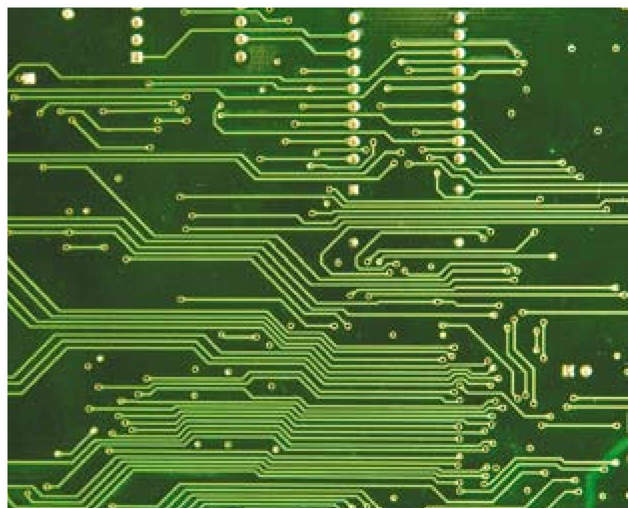
Por último, el uso de parámetros demasiado genéricos, como el tamaño total del cerebro, en lugar de medir las regiones directamente implicadas en las conductas, puede hacer confusas las comparaciones entre especies. Los murciélagos, por ejemplo, dependen del sentido del oído mucho más que nosotros. Debido a las diferencias de tamaño corporal, nuestra región auditiva en la zona subcortical del cerebro es mayor que la de estos quirópteros, lo que demuestra que el tamaño total no es informativo. Sin embargo, el tamaño relativo revela que la región auditiva del murciélago representa el 1,6 por ciento de su volumen cerebral, en comparación con el 0,015 por ciento en la especie humana. El problema de asociar comportamientos con regiones específicas del cerebro se ve agravado por las diferencias culturales entre las disciplinas científicas. Las investigaciones sobre el comportamiento suelen adoptar una estrategia comparativa y se basan en datos de diferentes especies. En cambio, los estudios neurobiológicos a menudo se centran en un escaso número de organismos modelo examinados en el laboratorio, donde expresan una gama de comportamientos más reducida que en la naturaleza. De hecho, un estudio reciente demostró que, a juzgar por el número de publicaciones, el 75 por ciento de los esfuerzos de los neurocientíficos se habían concentrado tan solo en tres especies: el ratón, la rata y la especie humana. Si se tiene en cuenta la estimación reciente de que existen 7,7 millones de especies animales en el mundo, se hace patente que esos modelos representan el $3{,}9 \times 10^{-5}$ por ciento de la biodiversidad animal.

CONSECUENCIAS RELEVANTES

Los problemas asociados a la miniaturización son más generales de lo que en principio pudiera parecer. Además de las múltiples especies con adultos en miniatura, muchas presentan adultos de tamaño moderado pero con estadios juveniles de vida libre muy pequeños. Los problemas ecológicos relacionados con la obtención y consumo de energía en los individuos jóvenes seguramente difieren de los que tienen los adultos. Debido a los mayores costes metabólicos, los animales más pequeños viven sin duda con unas limitaciones energéticas muy estrictas, sin gran capacidad para amortiguar episodios de escasez de alimentos. Ese hecho podría tener importantes repercusiones biológicas, como una reducción de la distribución geográfica del animal o de su supervivencia en períodos de escasez de alimentos u otros tipos de estrés, con lo que podrían favorecerse estrategias ecológicas alternativas. Las avispas parásitas (Hymenoptera), que utilizan huevos de insectos como huéspedes, son uno de los insectos adultos más pequeños que se conocen, tal vez porque sus larvas eclosionan en un entorno hospedador que contiene todos los nutrientes necesarios, lo que permite reducir al máximo el tamaño de los huevos y las reservas energéticas.

Los estadios juveniles de las especies representarían la vanguardia de las innovaciones evolutivas para resolver problemas fisiológicos asociados a la reducción del tamaño corporal de un linaje. ¿Guardan relación los desplazamientos de grado con las innovaciones que aumentan la eficiencia energética en el sistema nervioso central? Por ejemplo, los gorgojos exhiben un patrón alométrico entre cerebro y cuerpo de bajo grado, en comparación con muchos otros insectos. ¿Hay diseños que hacen que el sistema nervioso resulte más eficiente a la hora de generar capacidades conductuales? ¿Se asocia esa eficiencia al éxito evolutivo y ecológico de los gorgojos, uno de los taxones más diversos que existen en el mundo animal? Se desconocen las respuestas a esas preguntas, en parte porque rara vez han sido formuladas. Coincidimos con el biólogo John Bonner, de la Universidad de Princeton, quien subraya en su reciente libro que «el tamaño sí importa» en ecología y evolución. La comprensión de la evolución de la forma y la función del cerebro requiere datos exhaustivos sobre neuroanatomía, neurofisiología, comportamiento y ecología obtenidos en una gran variedad de especies, no solo en algunos animales modelo. Los es-





El diagrama de las conexiones **de 70 de las 134 fibras cerca del cordón nervioso ventral del nemátodo *Ascaris megalocephala* (*izquierda*) se asemeja a la arquitectura de un moderno chip de ordenador (*derecha*), con un número fijo de elementos y conexiones invariables entre ellos, a diferencia de lo que sucede en el cerebro humano, donde el número de neuronas y la conectividad entre ellas varía de forma drástica.**

FUENTE: DE «GRADE CHANGES IN BRAIN-BODY ALLOMETRY: MORPHOLOGICAL AND BEHAVIORAL CORRELATES OF BRAIN SIZE IN MINIATURE SPIDERS, INSECTS AND OTHER INVERTEBRATES», EN *ADVANCES IN INSECT PHYSIOLOGY*, ELSEVIER, VOL. 40, PÁGS. 155-214, 2011 (*conexiones nerviosas*); ISTOCKPHOTO (*chip*)/*AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE*



Las abejas, con un cerebro que alberga unas 850.000 neuronas, exhiben comportamientos complejos, equiparables o superiores a los de numerosos vertebrados. Mediante una danza en forma de ocho, utilizando el ángulo entre el tramo recto de la danza y la dirección de la gravedad, una abeja informa a sus compañeras sobre la ubicación de los alimentos en relación a la posición del sol, así como la distancia de estos respecto a la colmena.

KIM TAYLOR, WARREN PHOTOGRAPHIC LTD./*AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE*

tudios acerca del sistema nervioso y el comportamiento de especies muy pequeñas tienden a revelar fenómenos que no se observan en las más grandes, examinadas con mayor frecuencia. Las investigaciones neuroetológicas en los taxones con animales diminutos nos reservan tremendas oportunidades, así como la síntesis de datos e ideas de campos tan dispares como la alometría cerebral, el comportamiento animal, la ecología, la neurobiología, la zoología clásica de invertebrados y la biología molecular y del desarrollo. El conocimiento de los patrones y los procesos implicados en la miniaturización del cuerpo y del cerebro podría también arrojar luz sobre aquellos asociados al aumento de tamaño, lo que puede ayudarnos a comprender mejor las cruciales transiciones entre grados evolutivos.

No podemos concluir este análisis sin tener en cuenta un último aspecto. Hemos examinado varias consecuencias de la regla de Haller, pero no hemos dado ninguna explicación sobre por qué debería cumplirse. ¿A que se debe que organismos tan diversos como las distintas castas de hormigas que viven en un nido, los primates, las salamandras o los escarabajos posean un cerebro grande en relación a su reducido tamaño corporal? Los nuevos datos sobre invertebrados ayudan a descartar algunas interpretaciones antiguas que solo resultaban válidas para determinados grupos de vertebrados. Pero carecemos de una explicación general alternativa. En biología no es habitual que una tendencia universal como la regla de Haller presente una serie tan depauperada de hipótesis para explicarla. A menudo, el problema reside en un exceso de ideas contrapuestas que deben ser demostradas. Entender por qué la regla de Haller se cumple de modo tan uniforme puede contribuir a responder preguntas clave acerca de la evolución del sistema nervioso central y la existencia de los diferentes desplazamientos de grado.

PARA SABER MÁS

Miniaturization of body size: Organismal consequences and evolutionary significance. J. Hanken y D. B. Wake en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 24, págs. 501-519, 1993.
Why size matters. J. Bonner. Princeton University Press, Princeton, N.J., 2006.
Miniaturization effects in larvae and adults of *Mikado* sp. (Coleoptera: Ptiliidae), one of the smallest free-living insects. A. A. Polilov y R. G. Beutel en *Arthropod Structure and Development*, vol. 38, págs. 247-270, 2009.
Are smaller animals behaviorally limited? Lack of clear constraints in miniature spiders. W. G. Eberhard en *Animal Behaviour*, vol. 81, págs. 813-823, 2011.
The allometry of CNS size and consequences of miniaturization in orb-weaving spiders. R. Quesada, E. Triana, G. Vargas, M. Seid, J. Douglass, W. G. Eberhard y W. T. Wcislo en *Arthropod Structure & Development*, vol. 40, págs. 521-529. 2011.



BIOQUÍMICA

Viaje al interior del genoma

Lo que en su día fue bautizado como ADN basura resulta albergar tesoros ocultos, afirma el biólogo computacional Ewan Birney

Entrevista realizada por Stephen S. Hall

En el decenio de los setenta del siglo XX, cuando los biólogos se asomaron por vez primera al interior del genoma humano, observaron que los pequeños retazos de ADN que codificaban las proteínas (exones) parecían flotar como astillas de madera en un confuso mar genético. ¿Qué diantre hacían allí todos esos otros millones de letras de ADN? El propio Francis Crick, uno de los descubridores de la estructura de la doble hélice del ADN, sospechó que se trataba de «algo más que basura».

Desde entonces, los especialistas en genética humana se han desesperado por hallar el significado del «ADN basura», también calificado de redundante o no codificante. En el año 2000, cuando los investigadores del Proyecto Genoma Humano presentaron el primer borrador de la secuencia de bases, o código de letras del ADN, los resultados preliminares parecieron confirmar que la inmensa mayoría de la secuencia —quizás el 97 por ciento de sus 3200 millones de bases— carecía de una función aparente. En términos coloquiales, el «libro de la vida» mostraba todo el aspecto de un texto lleno de paja.

Pero casi al mismo tiempo, un consorcio integrado por docenas de laboratorios internacionales (entre ellos, el grupo de Roderic Guigó, del Centro de Regulación Genómica, en Barcelona, e investigadores del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas) se

EN SÍNTESIS

Ewan Birney, del Instituto Europeo de Bioinformática, en Cambridge, dirige el consorcio ENCODE, integrado por 400 genetistas de todo el mundo.

El proyecto tiene como objetivo crear una enciclopedia que describa la función de las partes más recónditas del genoma humano, en especial, el antaño denominado ADN basura.

Los primeros resultados han puesto de manifiesto que esas secciones del ADN, que representan una gran proporción del genoma, desempeñan importantes funciones reguladoras.


JOHN SPINKS

embarcó en un proyecto, tan ímprobo como poco conocido, con el propósito de identificar el lugar, tamaño y función de lo que un biólogo ha dado en llamar las «humildes regiones sin genes» del genoma humano. Bautizado como la *Encyclopedia of DNA Elements* (ENCODE), el proyecto se empeñó en un meticuloso examen de la larguísima doble hélice para descubrir todos los segmentos dotados de una finalidad biológica. El grupo publicó un informe preliminar en 2007 donde revelaba que, igual que nosotros almacenamos trastos en el altillo de casa, el ADN basura alberga tesoros ocultos en abundancia.

Ahora, en una serie de artículos publicados el pasado mes de septiembre en *Nature* y en otras revistas científicas, el grupo de ENCODE ha elaborado un sorprendente inventario de interruptores, señales e indicadores desconocidos hasta ahora, intercalados a lo largo y ancho del ADN humano. Durante el proceso, el proyecto ENCODE ha reinventando el vocabulario con el que se estudian, debaten y entienden la herencia y las enfermedades humanas.

Ewan Birney, de 39 años, del Instituto Europeo de Bioinformática en Cambridge, ha dirigido a los más de 400 científicos del proyecto ENCODE que han realizado el examen pormenorizado del genoma. Hace poco habló para nuestra revista sobre los hallazgos principales.

El proyecto ENCODE ha revelado un escenario rebosante de elementos genéticos importantes, antaño menospreciados y calificados como ADN redundante. ¿Pecaba de simplista nuestra antigua perspectiva sobre la organización del genoma?

Siempre se ha sabido que había algo más que los genes que codifican las proteínas. Estaba claro que existía una parte con funciones reguladoras, aunque se desconocía su magnitud.

Para situarnos en contexto, le diré que el 1,2 por ciento de las bases corresponde a los exones que codifican las proteínas. Y se especulaba con que podía haber un porcentaje similar implicado en la regulación o, tal vez, un poco más. Pero a la luz de los datos aportados por ENCODE, y siendo prudentes, puede afirmarse que entre el 8 y el 9 por ciento de las bases del genoma se hallan implicadas de uno u otro modo en la regulación.

Entonces, ¿la parte del genoma dedicada a la regulación de los genes es mucho mayor que la correspondiente a los genes propiamente dichos?

Sí, y ese 9 por ciento no lo es todo. La perspectiva más audaz considera que asciende al 50 por ciento de la parte muestreada. No cabe duda de que será mayor que el 9 por ciento; hablar del 20 por ciento no resultaría descabellado.

¿Debemos entonces olvidarnos del término «ADN basura»?

Así es, creo que debemos borrar este término del léxico. Se trataba de una denominación socorrida para describir fenómenos sumamente interesantes que se descubrieron en los años setenta. Pero estoy convencido de que no es una forma adecuada para designar su función.

¿Qué sorpresa les ha deparado el ADN no codificante?

En el seno del proyecto ENCODE y en círculos externos se ha debatido mucho si los resultados de los experimentos reflejaban lo que sucedía en la naturaleza. Y después se planteó una cuestión bastante más filosófica, que es si ese hecho importaba. En otras palabras, esos procesos pueden producirse a escala bioquímica, pero la evolución o nuestro cuerpo no se ven muy afectados por ellos.

El debate ha estado en el candelero desde 2003. Y nuestro trabajo, al igual que el realizado fuera del consorcio, ha dejado mucho más claro que las reglas de la evolución que rigen los elementos reguladores son distintas de las que controlan los elementos que codifican las proteínas. En suma, el recambio de los primeros es mucho más rápido. De modo que para un gen humano concreto casi siempre existirá otro similar en el ratón, pero esa norma no funciona con los elementos reguladores.

Si he entendido bien, en el ser humano existe una regulación más compleja de los genes y una evolución más rápida de los elementos reguladores.

Sin la menor duda.

Se trata de una forma bastante distinta de pensar sobre los genes y sobre la evolución.

Tengo la clara sensación de que antes desconocía mi propia ignorancia, mientras que ahora soy consciente de ella. Descubrir que uno no sabe resulta un poco descorazonador. Pero en eso consiste el progreso: para conocer las cosas hay que contar primero con una lista de lo que se debe entender. Y eso es lo que hemos conseguido.

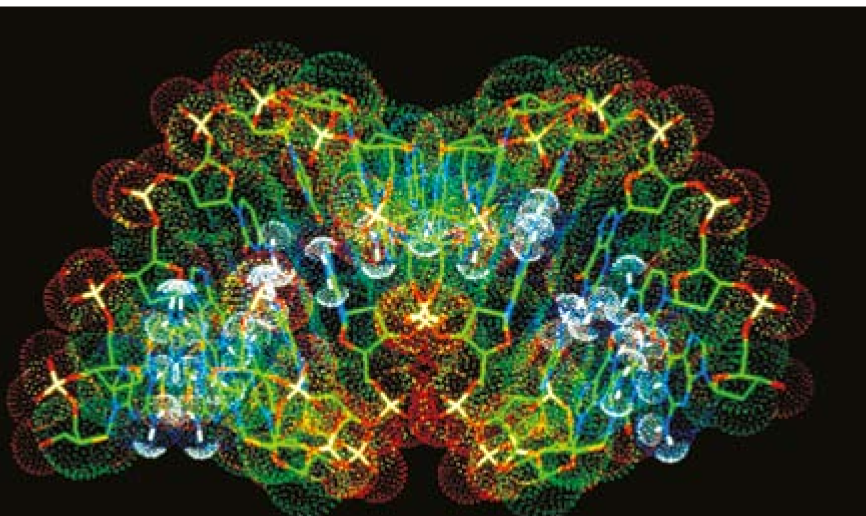
Los estudios anteriores indicaban que solo del 3 al 15 por ciento del genoma poseía una significación funcional, esto es, desempeñaba alguna tarea, ya sea codificar proteínas, regular el funcionamiento de los genes o cualquier otro cometido. ¿Me equivoco al decir que los datos de ENCODE indican, en cambio, que ese porcentaje podría ascender hasta el 80 por ciento?

Si se interpretan los datos de ENCODE, puede obtenerse una cifra que va del 9 al 80 por ciento, lo que sin duda supone un intervalo amplísimo. ¿A qué se debe? Volvamos un momento atrás: el ADN de nuestras células se halla empaquetado con diversas proteínas, la mayoría de ellas histonas, que suelen intervenir para mantenerlo todo en orden. Pero otras proteínas, los factores de transcripción, establecen interacciones específicas con el ADN. Un factor de transcripción se une solo a un millar de lugares repartidos por el genoma, o quizá como mucho a 50.000. Cuando se habla de ese 9 por ciento, nos estamos refiriendo en realidad a contactos sumamente específicos entre el ADN y los factores de transcripción.

Por otra parte, la transcripción del ADN en ARN parece suceder en cualquier momento, pues cerca del 80 por ciento del genoma se transcribe. Y todavía se debate si ese gran volumen de transcripción constituye un proceso de fondo sin excesiva importancia o si el ARN sintetizado desempeña un cometido que aún desconocemos.

Personalmente, creo que todo lo que se transcribe merece ser estudiado, una de las tareas que deberemos emprender en el futuro.

Muchos creen que las iniciativas para descubrir variantes genéticas relacionadas con enfermedades humanas mediante los estudios de asociación pangenómica (GWAS, por sus siglas en inglés) no han dado grandes frutos. De hecho, los resultados de ENCODE demuestran que cerca del 75 por ciento de las regiones de ADN que los GWAS habían vinculado a enfermedades no se ubican cerca de ningún gen. Desde el punto de vista médico, ¿ha sido



Enigma: En el ADN humano se ha descubierto una complejidad aún mayor que la que este «sencillo» modelo revela.

un error centrarse en las mutaciones del ADN que codifica las proteínas?

Los estudios de asociación pangenómica revisten un gran interés, pero no son una varita mágica para la medicina. Sus resultados nos han hecho devanar los sesos a todos. Pero cuando confrontamos esas asociaciones genéticas con los datos de ENCODE, se constata que si bien los *loci* están alejados de los genes que codifican proteínas, en cambio se hallan cerca de esos nuevos elementos que estamos identificando. Lo cual resulta estupendo. De hecho, cuando lo descubrimos, nos pareció demasiado bueno para creerlo y tuvimos que invertir mucho tiempo para revisarlo todo de nuevo.

¿Cómo nos ayudará este descubrimiento a entender las enfermedades?

Es como abrir una puerta. Piénsese en todos los modos en que puede estudiarse una afección, como la enfermedad de Crohn: ¿Debemos examinar las células del sistema inmunitario del intestino? ¿O estudiar las neuronas que lo inervan? ¿O bien, dirigir nuestro punto de mira al estómago y su funcionamiento?

Todas son opciones factibles. Pero ahora, el proyecto ENCODE le permite a uno analizarlas y llegar a la conclusión de que se debería comenzar a mirar cierta parte del sistema inmunitario, los linfocitos T coadyuvantes. Y lo mismo sucede con un gran número de enfermedades. Resulta ciertamente emocionante.

Ahora que el término «ADN basura» comienza a quedarse anticuado, ¿hay otra metáfora que pueda explicar mejor la nueva visión del panorama genético?

A mí me parece una auténtica jungla, una jungla densísima por la que hay que abrirse paso con esfuerzo. Uno intenta llegar a un lugar a golpe de machete, pero no sabe adónde ha llegado; es bastante fácil perderse.

Durante los últimos veinte años, el público ha escuchado en reiteradas ocasiones que los grandes proyectos genómicos —desde el Proyecto Genoma Humano hasta otros estudios en curso— nos iban a permitir explicar todo lo que necesitábamos saber sobre el «libro de la vida». ¿Constituye ENCODE el último capítulo de la saga?

Siempre hemos afirmado que se habían descrito los fundamentos sobre los que podía comenzarse a construir. Nadie dijo que una vez identificadas las bases del genoma humano ya estuviera todo hecho. Todos coincidimos en que las investigaciones se prolongarían durante cincuenta o cien años y se desarrollarían sobre ese conocimiento de partida. Pienso que el proyecto ENCODE representa el siguiente escalón de ese recurso fundamental al que otras personas podrán encaramarse para divisar más lejos. El principal cambio radica en la lista de incógnitas conocidas. Y a pesar de que descubrir lo mucho que ignoramos puede parecer un paso atrás, acotar las lagunas es realmente útil.

Hace diez años no sabíamos que no sabíamos. No hay duda de que ENCODE plantea muchísimas más preguntas que respuestas. Al mismo tiempo surgen ejemplos, como en la enfermedad de Crohn y en otros ámbitos, donde se están realizando avances rápidos y obteniendo frutos.

Sin embargo, se trata solo de un paso más. Un paso importante, sin duda, pero me temo que no hemos llegado a la meta en absoluto.

A veces se califica usted como «el domador de gatos» de ENCODE. ¿Cuántas personas participan en el consorcio y qué supone coordinar ese esfuerzo ingente?

Solo soy uno de los 400 investigadores participantes, la persona encargada de comprobar que el análisis se ha realizado y todo ha salido bien. Pero tengo que confiar en el talento de un sinfín de personas.

Luego soy algo así como un domador de gatos, el conductor, más que un cerebro privilegiado capaz de asimilar toda la información. Como decía, nos hallamos inmersos en una especie de jungla.

Bueno, pero tiene usted mucho mérito. No se trata de gatos sin más, sino de gatos bastante testarudos.

Sí, lo son. Creo que el símil sintetiza el carácter independiente y obstinado del científico corriente. Y a veces uno debe engatusar a esas personas de algún modo para que no se descarríen.

¿Vislumbra el momento en que toda esta información compleja se transformará en un mensaje más simple sobre la herencia y las enfermedades humanas? ¿O debemos aceptar el hecho de que la complejidad impregna nuestro ADN, como hasta ahora?

Somos seres complejos y, por tanto, debemos suponer que la complejidad existe por doquier. Pero creo que hemos de sentirnos satisfechos y tal vez hasta orgullosos de ello.

Stephen S. Hall *ha escrito sobre ciencia para* Atlantic, New York Times Magazine, New Yorker *y muchas otras revistas.*

PARA SABER MÁS

Proyecto ENCODE: **www.genome.gov/encode**

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburgo-Essen.

La deuda del Estado en decibelios

El abuso en el empleo de las escalas logarítmicas puede conducir a trivializar ciertas cantidades

Para echar una mano a Noé, que andaba retrasado con la construcción del arca, Dios le reveló las maravillas del sistema de numeración decimal moderno, incluida la coma para escribir números racionales. Mientras el patriarca apuntalaba las últimas planchas de madera bajo las temibles nubes que anunciaban el Diluvio, se decidió a poner en práctica sus nuevas habilidades matemáticas. Antes de embarcar a cada animal, midió su longitud corporal con una vara, la anotó y arrojó un guijarro a uno de nueve cestos, cada uno de ellos correspondiente a la primera cifra significativa del resultado. Sin embargo, cuál no sería su sorpresa al comprobar que el cesto asociado a la unidad se llenaba con mayor rapidez que los demás.

Su hijo menor, Jafet, observaba el extraño proceder de su padre con cierta desconfianza y no poco temor a que los 600 años de edad hubiesen hecho mella en el anciano. ¿Por qué iban a ser más frecuentes las longitudes corporales comprendidas entre una y dos varas que el resto? El hijo, que a sus 570 años se hallaba aún en plena forma, sospechaba que debía haber algún error en el procedimiento de su padre, por lo que resolvió repetir las mediciones. Pero, para mayor seguridad, escogió como unidad de longitud el palmo, el cual equivalía a media vara. Para su asombro, observó que la mayor parte de los guijarros iban a parar de nuevo al cesto correspondiente al número 1.

Un día lluvioso y anodino en alta mar, padre e hijo se sentaron y resolvieron el acertijo: todos los animales relativamente manejables que, según los cálculos de Noé, medían entre 0,5 y 0,99 varas (una vara equivalía a unos 45 centímetros), correspondían a entre 1 y 1,99 palmos de Jafet. En consecuencia, tantos guijarros había introducido Noé en los cestos del 5 al 9 como Jafet en el cesto unidad. No era de extrañar, por tanto, que este se hubiese llenado con rapidez. Lo mismo valía para los crustáceos de entre 0,05 y 0,1 varas de longitud que para los elefantes y otros seres de gran tamaño que midiesen más de 5 varas pero menos de 10. El lector podrá comprobar que el contenido de la cesta unidad de Noé se habría distribuido entre las cestas 2 y 3 de Jafet.

El fenómeno no solo se observa en la longitud corporal de los seres vivos, sino en todo tipo de cantidades naturales que recorren varios órdenes de magnitud (es decir, varias potencias de la misma base). En general, se observa que el tamaño de los cestos viene dado por la diferencia entre los logaritmos de dos dígitos consecutivos. Este resultado, que data de 1938, se conoce hoy como ley de Benford.

Otra manera de formular dicha ley consiste en decir que la primera cifra después de la coma de los logaritmos de todos los números se distribuye de manera uniforme entre el 0 y el 9 («en cestos igual de amplios»). Y a esta ley se debe que Simon Newcomb, matemático y astrónomo del siglo XIX, observase que las tablas de logaritmos siempre se encontraban mucho más usadas en las páginas correspondientes a las cifras menores [*véase* «En casi todas las tablas numéricas es más probable que los valores empiecen por los números más bajos», por Ian Stewart; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1993].

Resulta por tanto plausible que todos los intervalos que posean una razón fija entre el final y el comienzo (por ejemplo 1,1 entre 1) reciban igual número de guijarros. Semejante propiedad es manifiestamente invariante de escala, lo que quiere decir que se cumple con independencia de la unidad de medida escogida. Una distribución logarítmica uniforme satisface dicha invariancia de escala.

Sin embargo, la ley de Benford no se cumple para todos los conjuntos de valores. Ejemplos de ello son la altura de las personas adultas, que por lo general suele comprender un intervalo bastante reducido; el número de habitantes en las ciudades de entre 25.000 y 100.000 residentes, o los números de teléfono, ya que las cifras que los componen (después del prefijo) son números aleatorios que nada tienen que ver con magnitudes físicas.

El siete neutro

Hace ya tiempo que el jabón líquido neutro se convirtió en una alternativa a los jabones tradicionales, algo alcalinos. Hoy mucha gente prefiere el jabón «neutro para la piel», menos agresivo precisamente por no ser neutro: en realidad, posee un *p*H próximo al de la piel, algo ácida. De hecho, en el envase podemos leer que el *p*H asciende a 5,5. ¿Qué se esconde detrás? De nuevo, un logaritmo.

La molécula de agua (H_2O) presenta cierta tendencia, ligera pero a tener en cuenta, a disociarse y liberar un ión de hidrógeno (H^+). Este no permanecerá libre en el seno del líquido, sino que acabará uniéndose a otra molécula de agua, lo que dará lugar al ion oxonio (H_3O^+), también conocido como hidronio o hidroxonio. Por otro lado, como producto de la disociación de la primera molécula de agua, tenemos también un ion hidróxido (OH^-) en disolución. Así pues, la reacción completa es $2H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^-$.

En 1864, Cato Maximilian Guldberg y Peter Waage formularon una ley para describir el equilibrio dinámico de las reacciones químicas a la que dieron el arcaico nombre de ley de acción de masas. Bajo condiciones no demasiado exóticas, dicha ley nos dice que, si expresamos las concentraciones p de cada tipo de ion en moles por litro (un mol equivale a unas $6 \cdot 10^{23}$ partículas), el producto de $p(H_3O^+)$ y $p(OH^-)$ asciende a 10^{-14}. Ambos factores son iguales en el agua pura, o neutra, por lo que cada uno de ellos toma el valor de 10^{-7}. Por tanto, un litro de agua pura contiene unos $6 \cdot 10^{16}$ ejemplares de cada especie de ión.

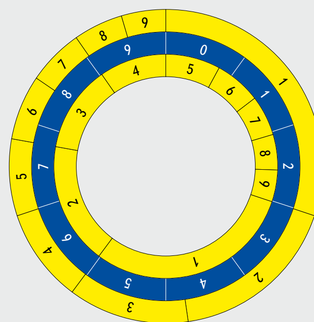
Las sustancias alcalinas, como el hidróxido de sodio (NaOH) aportan iones

LA LEY DE BENFORD Y LA ESCALA LOGARÍTMICA

Cuando Noé midió la longitud de los diferentes animales que entraron en su arca, halló que la mayoría de ellas comenzaban con el número 1, después con el número 2, etcétera, con independencia de la escala empleada para medirlas (*histograma)*.



El diagrama circular demuestra que la distribución no depende de si los animales se miden en varas, como hizo Noé (*escala interior*) o en palmos (*escala exterior, una vara equivale a dos palmos*). Al contrario que las magnitudes mismas, la distribución uniforme corresponde a la primera cifra significativa después de la coma de sus logaritmos (*escala azul*).



CHRISTOPH PÖPPE, SEGÚN NORBERT TREITZ

hidróxido adicionales. En consecuencia, para que el producto mencionado arriba tome el valor que le corresponde, la cantidad de iones oxonio debe reducirse. Por el contrario, las sustancias ácidas liberan iones H^+, con lo que elevan la concentración de oxonio y la cantidad de iones hidróxido disminuye.

Simplificando, podemos decir que el factor 5,5 del inofensivo jabón de manos significa que un litro de dicha sustancia contiene $10^{-5,5}$ moles de iones oxonio: unas 32 veces más que en el agua neutra. A partir de este valor, podemos concluir que hidróxido y oxonio ya no se reparten en una proporción de 1:1, sino de (1/32):32, o 1:1024.

En la nomenclatura *p*H, la letra *p* se refiere a la concentración (o, en un sentido más preciso, a la actividad) y la H, al ion oxonio, que antiguamente se representaba como H^+. Sin embargo, el valor numérico del *p*H no se corresponde con la concentración de iones oxonio, sino con su *logaritmo* en base diez, cambiado de signo. Un *p*H superior a 7 señala un comportamiento alcalino, o básico, y aquellos por debajo de 7, que la sustancia es ácida.

Un cambio de una unidad en el *p*H indica que las concentraciones de oxonio e hidróxido han variado en un factor 10 cada una; es decir, que su proporción se ha alterado en un factor 100. Como vemos, la escala *p*H resulta muy sencilla de manejar incluso para un profano, siempre que se tenga en cuenta que el valor neutro corresponde al número 7.

Tonos y frecuencias

Como ya sabemos gracias a Marin Mersenne, teólogo y matemático francés del siglo XVII, en un instrumento musical, la longitud de la parte de la cuerda que se halla en tensión es inversamente proporcional a la frecuencia con la que esta vibra. Cada sonido viene acompañado casi siempre por una serie de armónicos, tonos cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Si dos notas cuyas frecuencias guardan una proporción racional pequeña resuenan al mismo tiempo, gran parte de sus armónicos coincidirán, lo cual corresponde al fenómeno que percibimos como consonancia. Por ello, intervalos como la quinta (con una relación de frecuencias de 3:2) o la tercera mayor (5:4) son apreciados tanto por oyentes como por compositores. En el caso de una octava, en la que la razón entre frecuencias es igual a 2, los armónicos del tono más alto son un subconjunto de los del más bajo, lo cual explica por qué ambas notas reciben el mismo nombre.

El teclado de un piano y la notación en un pentagrama tradicional se corresponden en realidad con una escala logarítmica, ya que una distancia determinada en teclado o en el papel no representa una misma diferencia entre frecuencias, sino una idéntica proporción entre ellas. Lo anterior no deja de ser una aproximación, ya que, por razones históricas, dos teclas blancas en un piano se encuentran separadas en ocasiones por un semitono, y en otras, por un tono. La notación musical registra con fidelidad esta incoherencia. Para empeorar las cosas, cuando dividimos la octava en doce semitonos idénticos, la relación entre las frecuencias de dos semitonos consecutivos asciende a $2^{1/12}$ (la propia de la afinación por *temperamento igual*, la más común hoy en día), de manera que no obtenemos terceras o quintas puras.

Las diferentes afinaciones *bien temperadas* del siglo XVIII son harina de otro costal. Si bien reproducen «todos» los tonos de manera agradable para el oído, no lo hacen con los mismos intervalos. En el siglo XVII, el músico Andreas Werckmeister propuso cuatro afinaciones bien temperadas entre las cuales no se encontraba la de intervalos iguales (temperamento igual). Por desgracia, casi todos los manuales de física y, para nuestra sorpresa, no pocos libros de teoría musical y grandes enciclopedias, confunden la afinación bien temperada (o desigual) con la de temperamento igual.

Terremotos

En abril de 1992, algunos de nuestros compañeros de Duisburgo aseguraron casi haberse caído de la cama tras un temblor de tierra. Mientras tanto, otros habíamos seguido durmiendo sin percatarnos de nada. Aquel fue el seísmo más intenso en Centroeuropa desde hacía siglos, con epicentro en la ciudad holandesa de Roermond y con una magnitud igual a 6 en la muy conocida escala sísmica de Charles Richter.

A finales de 2004, un tsunami provocado por un terremoto en el océano Índico devastó amplias regiones en el sur y el sudeste asiáticos. Fue de magnitud 9. ¿Significa eso que su intensidad solo superó en 1,5 veces la sacudida de Duisburgo? En absoluto.

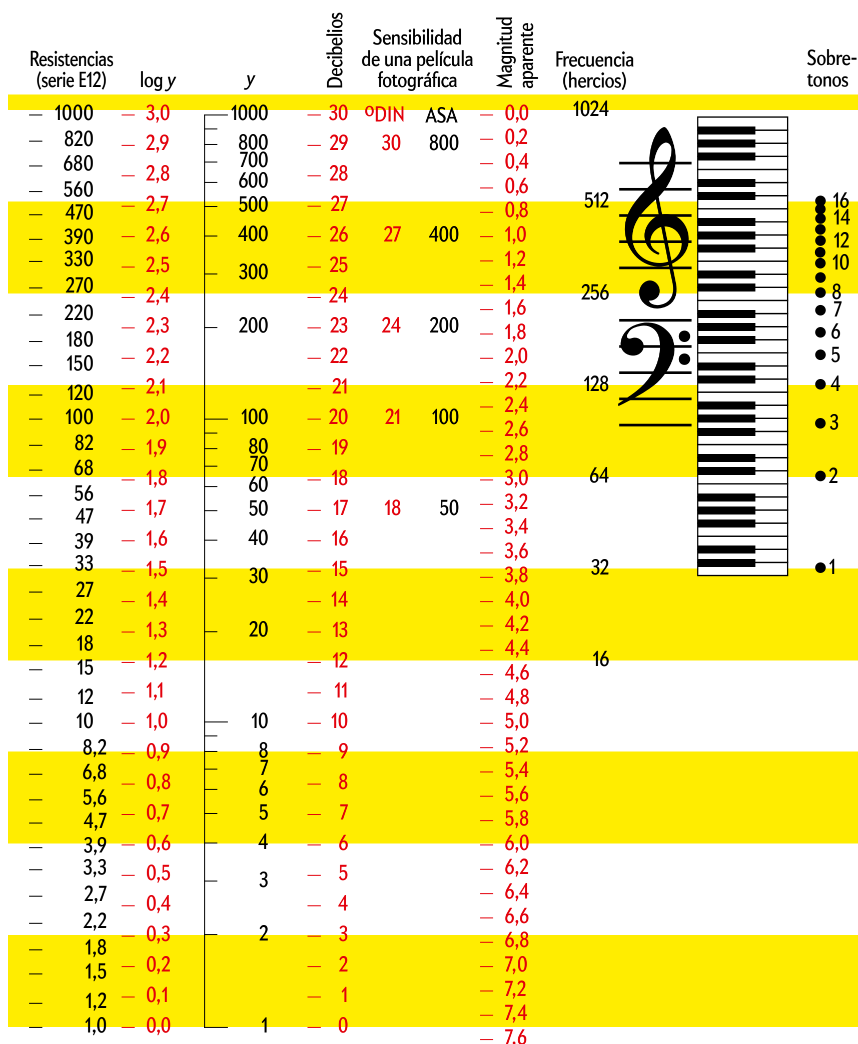
En ocasiones se afirma que la escala de Richter se encuenta «abierta por arriba». Ello solo significa que no se trata de una gradación acotada, como la escala sísmica de Mercalli o la escala fundamental de Beaufort para la intensidad del viento, sino que sus números se extraen a partir de las mediciones. En un terremoto se mide la amplitud de cierto tipo de ondas sísmicas en diferentes lugares y, a partir de ellas, se calcula la energía total liberada.

Sabemos que la intensidad aumenta como el cuadrado de la amplitud. Pero, por otro lado, la duración del fenómeno es mayor en terremotos más intensos. Al tener en cuenta ambos factores, por mé-

todos empíricos puede deducirse que a un terremoto con una amplitud 100 veces mayor le corresponde 1000 veces más energía. Si las amplitudes se indican en una escala logarítmica de base 10, como ocurre en la escala Richter, obtendremos para la energía estimada una escala de base raíz cuadrada de 1000: aproximadamente 31,6. En vista de lo anterior, podemos concluir que la diferencia entre un terremoto de magnitud 6 y otro de magnitud 9 corresponde a nada menos que un factor de en torno a 30.000 en cuanto a la energía liberada.

¿Podemos comparar tales valores con fenómenos de otra clase? Desde la existencia de las armas nucleares, la fuerza explosiva de estas se compara con la del trinitrotolueno (TNT), un potente explosivo que libera 4,2 megajulios por kilogramo. Tras algunos cálculos, llegamos a una fórmula sorprendentemente simple: un kilo de TNT equivale a un seísmo de magnitud 0 y, por cada factor de 1000, hemos de añadir dos unidades de Richter. Por tanto, para provocar un terremoto como el de Roermond, se necesitarían mil millones de kilogramos de TNT, o un megatón.

Aunque la escala de Richter no se encuentra acotada por arriba, los seísmos sí. En concreto, en torno a 9,5, no muy por encima de la intensidad del de 2004. Al parecer, si la corteza terrestre hubiese de soportar tensiones mayores, acabaría fragmentándose. ¿Posee la escala de Richter una cota inferior? Una escala lineal termina en el 0, pero en este caso se trata de una escala logarítmica. De hecho, un fuerte puñetazo en la mesa con una energía de 4 julios provoca un seísmo de intensidad −4.



Diferentes escalas que recorren tres potencias de diez, o diez potencias de dos. Las cifras en negro indican las magnitudes reales; las cifras en rojo, las pseudounidades logarítmicas correspondientes. Las franjas blancas y amarillas corresponden a las «octavas» (potencias de dos).

CHRISTOPH PÖPPE, SEGÚN NORBERT TREITZ

¿Ruido inofensivo?

Si cuando se realizan trabajos de construcción en las cercanías de su casa se siente usted molesto por el ruido, nadie le asegura que, dentro de poco, en vez de una no haya diez máquinas trabajando. Sin embargo, el especialista en acústica le tranquilizará: en tal caso, en lugar de 80 decibelios, solo deberá soportar 90. ¿Supone ello una diferencia del 12 por ciento? Probablemente, su médico no lo verá con tanta benevolencia. Es cierto que la diferencia entre tener que soportar el ruido de 50 máquinas y sufrir el de 60 resulta equiparable a pasar de 5 a 6, y no a 10 veces más. Sin embargo, el cálculo de densidades de energía sonora no deja de resultar bastante confuso.

El sonido es un fenómeno en el que se transporta energía. Una fuente de ruido presenta una potencia de emisión (medible en vatios) y genera, a diferentes distancias, sus correspondientes densidades de potencia (medidas en vatios por metro cuadrado). Nuestro oído muestra una gran sensibilidad para las ondas sonoras comprendidas en cierto intervalo de frecuencias. A 1000 hercios, comienza a reaccionar cuando la densidad de energía (sobre el tímpano) llega al umbral del picovatio (10^{-12} vatios) por metro cuadrado. Esa cantidad corresponde a una diferencia de presión de entre 20 y 30 micropascales, el equivalente a la que ejercería una película de agua de unos pocos átomos de espesor.

Pero, por desgracia, la mayoría de las veces nos hallamos expuestos a ruidos más intensos. Las verdaderas molestias aparecen cuando la amplitud de la diferencia de presión resulta unos tres millones de veces mayor que la umbral. En términos de densidad energética, ello supone multiplicar la cifra correspondiente por un factor de casi 10 billones: un uno seguido de 13 ceros.

Si decidimos tomar el número de ceros para cuantificar la intensidad del sonido, habremos definido el belio, así denominado en honor al célebre Alexander Graham Bell. Un belio corresponde, por tanto, al número de potencias de diez que median entre la intensidad umbral (un picovatio por metro cuadrado) y el sonido cuya intensidad deseamos medir. En la práctica, lo que se hace es emplear la décima parte

de una potencia de diez, o el decibelio (dB), el cual corresponde por tanto a una «unidad» en base $10^{1/10} = 1{,}2589$.

Sin embargo, no solo el umbral de percepción depende de la frecuencia, sino también el de dolor. Por ello, los aparatos de medida suelen contar con un filtro de frecuencias que se ajusta a esos umbrales de acuerdo con una serie de curvas, denominadas A, B o C. Así, la medida resultante se indica en dB(A), dB(B) o dB(C).

Todo lo anterior parece ajustarse a la perfección a la ley de Weber-Fechner sobre la percepción de estímulos [*véase* «Progresiones geométricas y pseudounidades», por N. Treitz; Investigación y Ciencia, septiembre de 2012]. Existen, sin embargo, otras unidades: el fonio resulta útil a la hora de comparar dos tonos de frecuencias diferentes pero que se perciben como de igual volumen y, a fin de formalizar qué intensidades sonoras nos parecen el doble o el triple que otra, tenemos el sonio, que mide la «sonoridad» de una fuente.

Aunque nuestros ojos deben manejar un espectro igualmente amplio de densidades de energía, la óptica se las arregla bastante bien sin tal variedad de magnitudes y unidades. Solo las definiciones de candela, lumen y lux reflejan el hecho de que la sensibilidad del ojo humano depende de la frecuencia de la luz (de lo contrario, la intensidades podrían expresarse sin más en vatios, o en vatios por metro cuadrado). Pero, con la excepción de la astronomía, las escalas logarítmicas no son moneda común en óptica.

Evitar la confusión

Aunque todos esos «códigos secretos» apenas hacen la vida un poco más fácil a los expertos, muy a menudo resultan confusos para el resto de la población, debido a los malentendidos que se derivan de un uso innecesario de las leyes de potencias y de las escalas logarítmicas correspondientes. Con ello no deseamos en absoluto acusar de malintencionadas a las comisiones de normalización que fijan el uso de esas unidades, aunque quizá sí de faltas de consideración hacia estudiantes y profanos. Aunque en tono humorístico, en cierta ocasión un compañero llegó a confesarme que había perdido el interés por enseñar astronomía en la escuela debido a la cantidad de tiempo y atención que debía dedicar a todo tipo de unidades superfluas y denominaciones arcaicas.

La naturaleza ya es lo bastante compleja como para que pongamos cortapisas innecesarias a su comprensión. Afirmar que «la fuente de ruido A suena tan alta como diez fuentes de tipo B» resulta más sencillo de entender que «la fuente A emite 10 decibelios más que la B». Por otro lado, limitarse a calificar de confusa una observación del estilo de «el terremoto de Roermond fue de magnitud 6, y el del Índico, de magnitud 9» resulta demasiado condescendiente cuando el segundo fue 30.000 veces más potente y devastador que el primero. Esperemos que, en el futuro, los Gobiernos no hallen una forma para expresar la deuda del Estado en decibelios u otra escala logarítmica.

por Agustín Rayo

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.



Gotas y partículas cuánticas

Sistemas macroscópicos, fenómenos de interferencia y la interpretación de De Broglie-Bohm de la mecánica cuántica

John Bush, matemático del Instituto de Tecnología de Massachusetts, es experto en dinámica de fluidos, una de las ramas más complejas de la matemática aplicada. La primera vez que oí hablar de él fue en 2003, cuando publicó un artículo en el que explicaba la manera en que ciertos insectos aprovechaban la tensión superficial para caminar sobre el agua. En ese y otros artículos, Bush nos descubre un vívido mundo paralelo en el que acciones ordinarias provocan efectos extraordinarios al estar gobernadas no solo por las fuerzas gravitatorias, sino también por los curiosos efectos de la tensión superficial.

El lector podrá imaginar la enorme curiosidad que sentí cuando un amigo me contó que el nuevo proyecto de Bush consistía en aplicar la dinámica de fluidos a la mecánica cuántica y que, en breve, impartiría una conferencia al respecto. En ella, el matemático describió una serie de experimentos liderados por Yves Couder, del Laboratorio de Materia y Sistemas Complejos de París, que demuestran que ciertos sistemas macroscópicos pueden modelizarse por medio de la mecánica cuántica. Como veremos, la idea básica resulta sorprendentemente sencilla.

En sus experimentos, Couder y su equipo llenan una bandeja con aceite de silicona (un líquido bastante más viscoso que el agua) y la someten a vibraciones, lo cual genera cierto patrón de ondas sobre la superficie del líquido. El paso siguiente consiste en dejar caer una pequeña gota sobre la muestra. Bajo las condiciones adecuadas, ocurre algo asombroso: ¡la gota comienza a rebotar sobre la superficie del líquido y continua haciéndolo de manera indefinida! Además, la vibración de la bandeja puede ajustarse de tal manera que la gota comience a «caminar». Al entrar en contacto con el líquido, la gota no se topa con la cima de una onda, sino con una pendiente que impulsa la gota en la dirección correcta. Por último, las condiciones del experimento pueden calibrarse para que una gota se desplace en línea recta sin detenerse.

Sin embargo, los fenómenos más interesantes aparecen cuando los investigadores sueltan más de una gota sobre la bandeja. Cada vez que una de ellas rebota, su impacto altera el patrón de ondas sobre la superficie, lo cual afecta al comportamiento de las otras gotas. ¿Cómo modelizar un sistema así? La respuesta de Couder, Bush y sus colaboradores resulta fascinante: utilizando los principios de la mecánica cuántica. Para entender por qué, hagamos primero un pequeño interludio.

Mecánica cuántica

De acuerdo con la interpretación estándar de la mecánica cuántica, la interpretación de Copenhague, el estado de un sistema cuántico queda completamente descrito por la función de onda. En general, sin embargo, esta no especifica valores exactos para cantidades como la posición o el momento de una partícula, sino solo la *probabilidad* de obtener un resultado u otro en un experimento. De hecho, con anterioridad a una medición, no podemos decir que la partícula posea posición ni momento determinados.

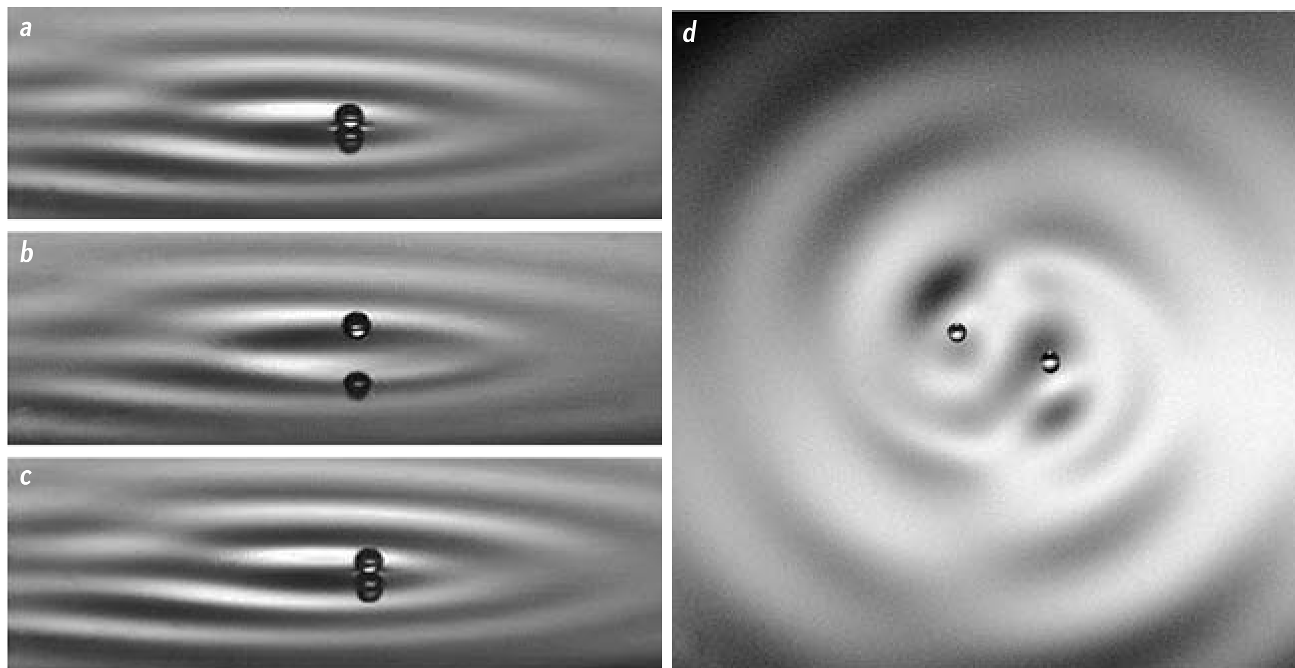
Pero esa no es la única manera de entender los fenómenos cuánticos. En 1927, el físico francés Louis de Broglie propuso una interpretación alternativa, según la cual las partículas cuánticas siempre gozan de posición y momento bien definidos. En la teoría de De Broglie, sin embargo, el comportamiento de las partículas cuánticas no queda completamente determinado por sus propiedades locales, como la posición o el momento. Es necesario conocer también el estado de la «onda piloto» del sistema: una entidad independiente cuyos valores no pueden derivarse a partir de las propiedades locales de las partículas.

La teoría de De Broglie no fue muy influyente, en parte porque carecía de una buena teoría de la medida. Pero, en 1952, el físico estadounidense David Joseph Bohm halló una manera de solucionar el problema y propuso una nueva versión de la interpretación de De Broglie. La teoría resultante, conocida como interpretación de De Broglie-Bohm, predice los mismos resultados experimentales que la interpretación de Copenhague. Y aunque esta última constituye hoy en día la explicación del mundo cuántico dominante entre los físicos, la interpretación de De Broglie-Bohm goza de una consideración muy seria entre los filósofos de la física.

Gotas y rendijas

Más arriba nos preguntábamos cómo modelizar el comportamiento de las gotas de Couder y su equipo. Hace unos años, estos investigadores hallaron que el sistema podía describirse en términos muy similares a los que empleaba la teoría de De Broglie. En concreto, las gotas desempeñarían una función análoga a las partículas cuánticas de De Broglie, mientras que los patrones ondulatorios sobre la superficie del líquido serían el equivalente de la onda piloto. En ambos casos, el comportamiento de las partículas (o gotas) depende no solo de sus propiedades locales, como la posición y el momento, sino también del estado de las ondas.

La conclusión anterior se apoya en una serie de experimentos más que notables. Mi favorito es una versión macroscópica del experimento de la doble rendija. En su versión habitual, entre una fuente de partículas y una placa fotográfica se interpone una pantalla con dos rendijas, de modo que las partículas no pueden pasar al otro lado a menos que



Partículas y ondas: La interacción de una gota de aceite de silicona con las ondas generadas en la superficie del líquido puede ajustarse de tal manera que la «partícula» proceda en línea recta (*a-c*). En la secuencia, el movimiento de la gota se compone de una serie de saltos parabólicos que transportan la gota hacia la cresta delantera de la onda generada en la colisión previa. La dinámica de dos gotas y la de las ondas asociadas también pueden coordinarse para inducir un movimiento orbital (*d*). Bajo ciertas condiciones, la interacción con las ondas superficiales provoca que las gotas exhiban un comportamiento análogo al que muestran las partículas cuánticas en los experimentos de interferencia.

lo hagan a través de alguno de los orificios. En un mundo clásico, esperaríamos detectar partículas solo en aquellas regiones de la placa situadas en las líneas rectas que conectan la fuente con las rendijas. En un sistema cuántico, sin embargo, lo que se observa es un patrón de interferencia a lo largo de toda la placa fotográfica.

¿A qué se debe ese comportamiento? De acuerdo con la teoría de De Broglie, aunque cada partícula describe una trayectoria bien definida y pasa por una —y solo una— de las rendijas, su onda piloto lo hace por ambos agujeros. De este modo se produce un fenómeno de interferencia, el cual altera la trayectoria de las partículas en su camino hacia la placa fotográfica.

El equipo de Couder realizó una versión macroscópica del mismo experimento en la bandeja de aceite. En él, la pantalla se sustituye por una pared vertical que se alza desde el fondo de la bandeja hasta casi la superficie del líquido, de tal modo que las gotas no pueden traspasarla. La pared cuenta con dos «rendijas»: dos pequeñas regiones a través de las cuales las gotas sí pueden pasar. Al igual que en el experimento clásico, se disparan «partículas» (es decir, gotas) hacia la pared, tras la cual se sitúa el equivalente a la placa de detección. Cuando el experimento se repite con un gran número de gotas, lo que se observa en la placa es, precisamente, el mismo patrón de interferencia que caracteriza a los sistemas cuánticos.

¿Cómo se explica el resultado? Tal y como haríamos en el caso cuántico a partir de la interpretación de De Broglie: aunque cada gota describe una trayectoria bien definida y cruza la pared por solo una de las dos rendijas, las ondas sobre la superficie del líquido pasan por ambas. De esta manera, interfieren y alteran la trayectoria de las gotas que van camino de la placa de detección.

Mirando hacia el futuro

La existencia de un sistema macroscópico con comportamientos cuánticos constituye un resultado espectacular. Pero ¿qué nos enseña acerca de la mecánica cuántica?

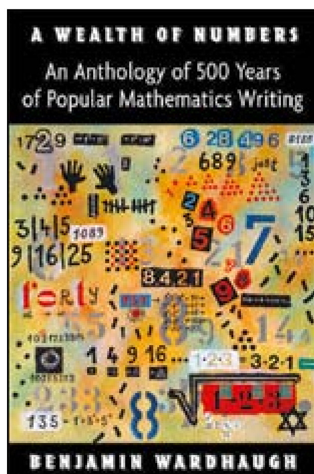
La respuesta no es nada obvia. Sin duda, el trabajo de Couder y su equipo supone un triunfo de la matemática aplicada y resalta la importancia de la interpretación de De Broglie-Bohm sobre los fenómenos cuánticos. Sin embargo, lo verdaderamente cautivador sería que este tipo de estudios sobre sistemas macroscópicos nos permitieran realizar alguna predicción relativa al comportamiento del mundo cuántico. Un resultado semejante ejercería un profundo impacto en nuestra manera de pensar sobre la mecánica cuántica. Por ahora, sin embargo, habrá que esperar. El proyecto de Couder, Bush y sus colaboradores apenas ha comenzado.

PARA SABER MÁS

El experimento de la doble rendija con gotas de aceite fue descrito en 2006 por Y. Couder y E. Fort en **Single particle diffraction and interference at a macroscopic scale,** *Physical Review Letters* 97, 154101.

John Bush ha escrito una buena introducción al trabajo de Couder y su grupo en **Quantum mechanics writ large,** *PNAS*, vol. 107, n.º 4, octubre de 2010. Se encuentra disponible en **www.pnas.org/content/107/41/17455.full.pdf+html**

En castellano, Wikipedia cuenta con una extenso artículo sobre la interpretación de De Broglie-Bohm: **es.wikipedia.org/wiki/Interpretación_de_Bohm**



A WEALTH OF NUMBERS. AN ANTHOLOGY OF 500 YEARS OF POPULAR MATHEMATICS WRITING,

Dirigido por B. Wardhaugh. Princeton University Press; Princeton y Oxford, 2012.

Una aproximación a la matemática basada en textos populares

Los problemas pensados como pasatiempos constituyen una herramienta metodológica y didáctica

El pasado año se celebró en España el centenario de la Real Sociedad Matemática Española. Relacionado con esta efeméride el periódico *El País* inició un concurso de resolución de problemas de matemáticas a lo largo de treinta semanas. A su vez, *La Vanguardia* y la Sociedad Catalana de Matemáticas durante 42 días en las páginas veraniegas «Viure l'estiu» publicaron un problema diario de las pruebas Canguro pero a modo de *divertimento*. Esta iniciativa se ha retomado durante el mes de agosto de este año bajo el epígrafe «El cervell matemàtic».

La idea de considerar los problemas, más o menos sencillos, más o menos concretos, más o menos lúdicos, como una herramienta para aproximarnos a la matemática, a su lenguaje, a sus intuiciones geométricas y a sus triquiñuelas, es muy antigua y didáctica. Metodológicamente se considera muy fructífera, si no se impone. En nuestro entorno tenemos ejemplos dignos de mención de este uso, de los que solo recordaré dos: Miguel de Guzmán y Claudi Alsina.

Esta es la filosofía a la que recurre B. Wardhaugh en su *A wealth of numbers* para resolver las preguntas con las que abre el prefacio. «¿Cómo pensó la matemática la gente en el pasado? ¿De qué manera escribieron sobre ella? ¿Cómo la aprendieron y la enseñaron?» Para responderlas nos ofrece un centenar de textos de «matemática popular» esparcidos a lo largo de los últimos quinientos años y que organiza en once capítulos sobre ítems muy diversos: de las triquiñuelas y los juegos, a los rompecabezas y los problemas; de la aritmética al álgebra; de la geometría a la trigonometría; de la reflexión al humor.

El fundamento del libro son, como ya he dicho antes, textos matemáticos de mayor o menor enjundia, en la línea que él mismo defendía en su conocido y sintético *How to read historical mathematics* (Princeton 2010), reseñado en esta sección en julio de 2011: «Leer matemática histórica constituye un reto fascinante, enriquecedor y gratificante».

Si bien resulta difícil dar una idea precisa de esta obra, más allá de lo dicho, por la dispersión de los temas que se tratan, voy a hacer una breve selección, muy sesgada por mi particular visión de lo que es realmente interesante.

El libro abre con un texto de H. Baker («The well spring of sciences», 1564) en el cual se ofrece una regla para descubrir el número que hemos pensado. Este primer capítulo contiene un texto de H. E. Dudeney sobre caminos que se pueden o no pueden recorrer («Dodging the mastodon and the plesiosaurus»). Se propone también el juego del Nim, cuya solución siempre me ha sorprendido. El problema es simple: «Dos jugadores parten de una cierta cantidad de pilas de lentejas. Cada uno de ellos puede quitar sucesivamente, de una de las pilas, las lentejas que quiera. Pierde el que recoge la última lenteja». La cuestión es: ¿El problema tiene una estrategia ganadora? ¿Gana siempre el jugador que empieza?

El capítulo que va de la aritmética al álgebra nos ofrece la resolución de las ecuaciones cuadráticas (*Popular educator*, 1855) y de las cúbicas (texto de J. E. Thompson, 1931), pero quizás el texto más curioso es la regla de tres en verso (N. Withy, 1792).

De los retos matemáticos (*Mathematical challenges*, 1989), quiero remarcar dos. El primero, puramente aritmético, se refiere a una ecuación diofántica que tiene una respuesta negativa: «La ecuación $x^4 + 131 = 3y^4$ carece de solución entera». El segundo, que destaco por su curiosidad, juega con la escritura formal mezclada con la escritura tipográfica. Dice: «Un editor comete errores al escribir los números y escribe $5^4 2^3$ cuando debería escribir 5423. En otro lugar del texto comete un error semejante, con cuatro enteros, pero en tales casos el error carece de importancia». Y pide que se resuelva sin usar ninguna computadora.

Un texto de A. C. Gardner, de 1956, recoge las reglas de Napier de la resolución de triángulos rectángulos esféricos. Otro (H. Rademachar y O. Toeplitz, de 1957) resuelve el problema más clásico de la obtención de las ternas pitagóricas que les sirven para recordar el último teorema de Fermat. Hallamos también el problema del infinito numérico a partir de la paradoja de Galileo (D. Pedoe, 1958) y una breve aproximación al problema de los cuatro colores (W. W. Rouse Ball, 1892).

El capítulo sexto Wardhaugh lo dedica, siempre recurriendo a textos de autores que nos han precedido, a aproximarnos a ciertos instrumentos de cálculo y astronómicos y a su uso. El capítulo siguiente ofrece perfiles de ciertos matemáticos del pasado: Pitágoras, Kepler, Newton, Euler, Hardy y Littlewood.

Entre otros textos curiosos nos propone el del «Juego de la lógica» de Lewis Carroll, 1987, en el cual Carroll ofrece un método gráfico —una suerte de diagramas de Venn— para resolver silogismos y sorites, y «Un nuevo aspecto del método matemático» de George Polya (1945). Como es usual en Polya, plantea un problema concreto —de geometría en este caso— y ofrece luego el camino metodológico que puede llevarnos a su resolución: establecer las hipótesis, precisar la conclusión, buscar un problema análogo que pueda ayudarnos a resolver este, etcétera. Un texto simple y elegante, como la mayoría de los de Polya.

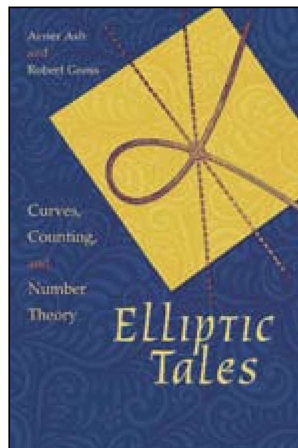
El libro cierra con un capítulo más literario en el que encontramos los poemas: «El amor de los triángulos» y «Oda a la Matemática».

La originalidad del libro, quizá demasiado disperso en los temas que trata, reside en el hecho de recurrir a textos no excesivamente especializados y, en muchos casos, absolutamente divulgativos, de autores —muchos de los cuales me eran completamente desconocidos— que pretenden llevarnos de la mano por el mundo fascinante, a veces demasiado complejo, a veces demasiado incompren-

dido, de la matemática y de algunos extremos de la física.

Cabe señalar, aunque no debe sorprendernos excesivamente en un texto de un autor inglés, el enorme olvido de las aportaciones que en este aspecto lúdico-didáctico han realizado matemáticos de otras latitudes y lenguas: franceses, germanos, holandeses, rusos... y también de países de otros continentes como China o la India.

—Josep Pla i Carrera
Universidad de Barcelona



ELLIPTIC TALES: CURVES, COUNTING, AND NUMBER THEORY,

por Avner Ash y Robert Gross. Princeton University Press; Princeton, 2012.

Curvas elípticas

Conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer

Quien haya leído *Fearless symmetry: Exposing the hidden patterns of numbers* ya conoce las extraordinarias habilidades expositivas de Avner Ash y Robert Gross, expertos en teoría de números. A la manera de los peregrinos de *Canterbury tales*, de Chaucer, que aligeraban su peregrinación hasta la tumba de Santo Tomás Becket contándose historias, la gavilla de narraciones matemáticas recogidas en *Elliptic tales* habrían de conducirnos hasta los secretos de las curvas elípticas. El libro gira en torno a la teoría de números. Esta disciplina de la matemática de frontera adquirió un desarrollo particular a lo largo del siglo xx. Con la demostración del último teorema de Fermat por Andrew Wiles, en los años noventa, las curvas elípticas recibieron un vigoroso impulso, si bien había sido campo favorito de aritméticos y geómetras algebraicos mucho antes. Por no hablar de su extensa aplicación en criptografía. Estas curvas, adviértase, no son elipses. Hablamos de unas ecuaciones diafantinas en las que los métodos analíticos desempeñan un papel crucial.

Las curvas elípticas son regulares, sin vértices, ni autointersecciones. Se puede definir una operación binaria para el conjunto de sus puntos de una manera geométrica natural, lo que hace de dicho conjunto un grupo abeliano. Las curvas elípticas sobre el cuerpo de los números reales vienen dadas por las ecuaciones $y^2 = x^3 - x$, y por $y^2 = x^3 - x + 1$. Las curvas elípticas son ecuaciones cúbicas de dos variables.

Se nos describen aquí los últimos desarrollos en teoría de números a través de la consideración de uno de los problemas irresueltos y más excitantes de la matemática contemporánea, la conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer. La clave de la conjetura reside en las curvas elípticas. Enunciada por los matemáticos ingleses Bryan Birch y Peter Swinnerton-Dyer, la conjetura que lleva su nombre, abreviadamente conjetura BSD, es uno de los siete problemas del milenio, cuya resolución premia el Instituto Clay de Matemáticas con un millón de dólares.

A principios del decenio de los sesenta del siglo pasado, Swinnerton-Dyer recurrió a la computadora del laboratorio de informática de la Universidad de Cambridge para calcular el número de puntos módulo p (denotado N_p) para una cifra elevada de primos p sobre curvas elípticas cuyo rango fuera conocido. De esos resultados numéricos Birch y Swinnerton-Dyer conjeturaron que N_p para una curva E con rango r obedecía una ley asintótica. En breve, la conjetura establece que, para cualquier curva elíptica racional, el rango analítico y el rango algebraico coinciden. Para Ash y Gross, la conjetura BSD implica también un criterio explícitamente computable de si n es un número congruente, para mostrar luego que n = 1.234.567 cumple esa condición. En el camino se nos ilustra sobre teoría de grupos, series de Dirichlet, series de Taylor, funciones L, etcétera.

En matemática, los números cero, más menos uno, más menos dos, más menos tres, etcétera se denominan números enteros; la razón entre dos enteros (por ejemplo, 1/3 o –2012/2011), número racional. Determinar las soluciones de una ecuación dentro de los números racionales constituye uno de los temas principales de la teoría de números. Por ejemplo, $3x^2 - 2y^2$ p = 1 es una ecuación; resulta harto fácil hallar un par de soluciones racionales: $x = 1$ e $y = 1$. Pero ya menos fácil encontrar un par tal como $x = 163/197$ e $y = 143/197$, y $x = 683/725$ e $y = 661/725$. De hecho existen infinitos pares de soluciones de esta ecuación. El libro de Avner Ash y Robert Gross comienza con el algoritmo que nos lleva a todas ellas.

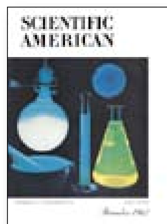
Una curva elíptica puede describirse por una ecuación de la forma $y^2 = x^3 + Ax + B$, donde A y B son enteros fijos. Por ejemplo, $y^2 = x^3 - x$ es una curva elíptica, porque $A = -1$ y $B = 0$. (En realidad existe una condición técnica que estamos pasando por alto y es que el polinomio cúbico $x^3 + Ax + B$ debe tener tres raíces desiguales para que la ecuación defina una curva elíptica.) Se llama también curva elíptica al conjunto de soluciones de esa ecuación.

Las ecuaciones de dos variables como esta, en que la potencia superior de las variables es 3, se hallan en la frontera entre las ecuaciones de grado inferior, fáciles de resolver, y las ecuaciones de grado superior, muy difíciles. De hecho, nadie ha dado con un algoritmo capaz de resolverlas. Las dificultades que entraña computar el conjunto completo de soluciones de una curva elíptica han quedado recogidas en un objeto matemático conocido por grupo de Tate-Shafarevich, una teoría elegante en torno a las curvas elípticas que ha atraído la atención de los matemáticos modernos.

Cuando el grado de una ecuación de dos variables es 3, las soluciones de la ecuación poseen estructura de grupo. El grado es importante porque una recta intersecará una curva descrita por una ecuación de grado d en d puntos. Si el grado es 3, una recta intersecará una curva elíptica en exactamente tres puntos. En toda curva elíptica hay, además, dos conceptos de rango, el algebraico y el analítico. El rango algebraico mide cuántas soluciones racionales hay de la ecuación de la curva elíptica dada. El viaje de este libro concluye con la conjetura de Birch-Swinnerton, que afirma que, para cualquier curva elíptica dada, su rango algebraico equivale siempre a su rango analítico.

—Luis Alonso

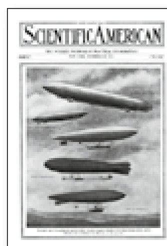
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Diciembre 1962

Primavera silenciosa

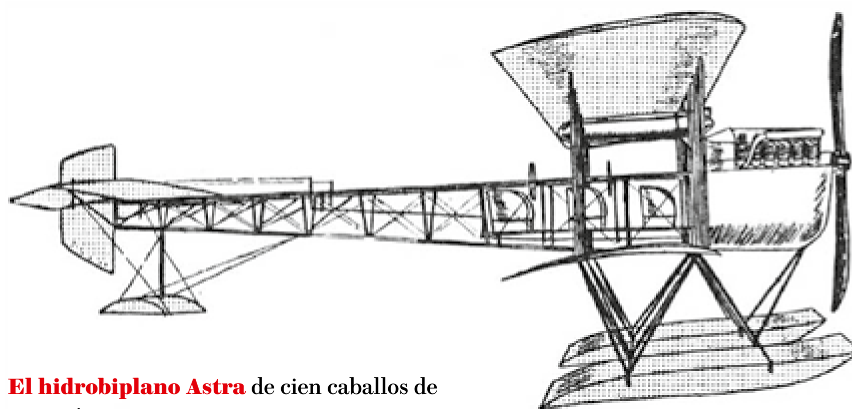
Reseña de Lamont C. Cole sobre *Primavera silenciosa*, de Rachel Carson. Houghton Mifflin Company (5 dólares): «Como ecólogo, me congratulo de la publicación de este provocativo libro. Ello no significa que considere que ofrece una valoración justa e imparcial de cuanto plantea. Al contrario: se trata de una selección muy tendenciosa de ejemplos e interpretaciones que apoyan las tesis de la autora. Persiste el hecho de que la postura opuesta haya sido grabada en la población por expertos profesionales forjadores de la opinión pública. Es hora de que el profano se interese de manera objetiva por lo que el hombre está haciendo para alterar su entorno. *Primavera silenciosa* ofrece terribles ejemplos del modo en que la naturaleza ha sido dañada a causa de un uso indiscriminado de productos químicos de síntesis».



Diciembre 1912

Exhibición aérea de París

«Este año el número de máquinas voladoras ha llegado a 77. La máquina Astra se halla equipada para volar sobre el agua, y en su construcción se ha empleado abundante acero. Conserva el antiguo sistema Wright de alas flexionadas y sujetas por riostras. Cuenta con tres plazas. Dotada de un motor Renault de 12 cilindros y 100 caballos de potencia, parece apta para trabajos de importancia.»



El hidrobiplano Astra de cien caballos de potencia, 1912.

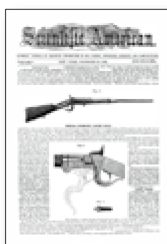
SCIENTIFIC AMERICAN SUPPLEMENT, VOL. LXXIV, N.º 1926, 14 DE DICIEMBRE DE 1912

Los perros de Pavlov

«Hace ya varios años que el brillante fisiólogo ruso Pawlow [Pavlov] viene realizando una investigación exhaustiva y con métodos científicos de laboratorio sobre los actos reflejos de los animales. Dice la *Deutsche Revue*: "Paulov ya no habla de psico-reflejos, sino de reflejos condicionados y no condicionados. Estos últimos son los que de manera invariable aparecen cuando el estímulo apropiado se abre paso por una ruta sensorial, como cuando nos introducimos comida en la boca y se produce el flujo de saliva. Los estímulos artificiales condicionados producen el mismo efecto. Si se hace sonar repetidamente una misma nota musical a la vez que ofrecemos a un perro un alimento determinado, al cabo de cierto tiempo el mero sonido de la nota provocará la efusión de saliva. Pero esta no fluirá si hay la más mínima variación en el tono".»

La estación central de Nueva York

«Entre las grandes estaciones terminales de todo el mundo, no sabemos de ninguna cuya arquitectura se acomode mejor a los fines del edificio. El efecto general es de gran dignidad y belleza. Dado que constituye la puerta de entrada de una gran red ferroviaria al corazón de la mayor ciudad del país, la fachada de la calle 42 y las imponentes estatuas que la coronan deben ser reconocidas como éxito arquitectónico distinguido.»



Diciembre 1862

Ascensores más seguros

«Los Hermanos Otis, de Yonkers (Nueva York), están construyendo un aparato elevador muy práctico e ingeniosamente diseñado, concebido especialmente para almacenes y depósitos. Justo sobre el cabezal al que se halla amarrada la cuerda puede verse un trinquete sujeto a los maderos que guían la plataforma. Es este un detalle de la mayor importancia, pues asegura la integridad de las mercancías y las vidas de las personas que pudieran encontrarse cerca en caso de que un accidente afectase a la maquinaria de elevación o a la cuerda.»

Hoy la Otis Elevator Company cuenta con 2,4 millones de ascensores operativos en todo el mundo.

¿El final de la esclavitud?

«El presidente [Abraham Lincoln] urge con insistencia en lo que él califica como "emancipación compensada" de la esclavitud. Propone inaugurar el gran jubileo en el año 1900 mediante el pago a los propietarios de esclavos, a modo de concesión mutua a ambas partes y como asunto de justicia para quienes son dueños de ese tipo de propiedad. Dado que es del todo evidente que la guerra entre la esclavitud y la libertad continuará librándose con cada vez mayor encarnizamiento, el presidente espera modificar su intensidad decidiéndose por un cierto plazo a partir del cual la institución desaparecerá para siempre. Piensa que esa política acabará con la guerra y garantizará la justicia para todos los implicados, al tiempo que el país se pondría a salvo de cambios violentos y repentinos en su organización interna. Esa manera de afrontar la cuestión nos impresiona por su humanidad, y si las facciones más radicales de ambas partes se avinieran a aceptarla como base de un acuerdo, la paz nos bendeciría de nuevo. Sin embargo, la confrontación ha alcanzado tales niveles de crudeza que, tememos, ningún compromiso de esa clase resultará aceptable ni satisfactorio.»



FÍSICA DE PARTÍCULAS

La vida en el interior de los quarks

Don Lincoln

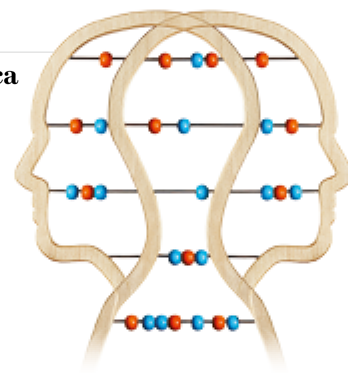
¿Y si los componentes últimos de la materia esconden un mundo de partículas por descubrir?

NEUROCIENCIA

Cultive su propio ojo

Yoshiki Sasai

Se ha conseguido que un grupo de células formen una retina. Ello supone un importante paso en la creación, fuera del cuerpo, de órganos para trasplantes.



BIOLOGÍA

Autismo y mente técnica

Simon Baron-Cohen

La progenie de científicos e ingenieros pudiera heredar genes que confieren talento intelectual y otros que predisponen al autismo.

PALEONTOLOGÍA

El ave más extraña

R. Ewan Fordyce y Daniel T. Ksepka

Fósiles descubiertos en fecha reciente revelan la sorprendente historia evolutiva de los pingüinos.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Informe especial: Estado de la ciencia global*, *Foro científico*; Tanja Sachse: *Sistemas geotérmicos mejorados*; Sara Arganda: *El lenguaje del cerebro*; Alberto Ramos: *¿Esconde el bosón de Higgs nueva física?*; Joandomènec Ros: *Ecosistemas al borde del colapso*; Xavier Bellés: *Cerebros en miniatura*; Andrés Martínez: *Viaje al interior del genoma*; Bruno Moreno: *Apuntes*; M.ª Rosa Vallés: *Ciencia y gastronomía*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España